



Hélder Gaspar
Oliveira Giesteira

**Desenvolvimento de uma eletroválvula de gás
on/off de baixo consumo energético para
aplicação em esquentadores domésticos**



**Hélder Gaspar
Oliveira Giesteira**

**Desenvolvimento de uma eletroválvula de gás
on/off de baixo consumo energético para
aplicação em esquentadores domésticos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Mestre Ricardo Luís d'Abreu Fernandes Carranca

Engenheiro da Bosch Termotecnologia, S.A. (arguente)

Agradecimentos / Acknowledgements

A realização da presente dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos, sem os quais não atingiria os objetivos propostos e aos quais estarei eternamente grato.

Agradeço primeiramente à Universidade de Aveiro, uma das mais dinâmicas e inovadoras universidades do país, por me ter proporcionado a oportunidade de formação, o excelente ambiente e condições de estudo durante todo o período de aprendizagem, oferecendo todo o apoio, além de condições técnicas e logísticas para o desenvolvimento da presente dissertação.

Em seguida, agradeço ao meu Orientador, Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira, ao meu Co-orientador, Professor Doutor Vítor António Ferreira da Costa e ao colaborador externo, Mestre Ricardo Luís d'Abreu Fernandes Carranca a possibilidade de poder realizar este trabalho, pelo apoio, orientação e disponibilidade sempre prestados. Agradeço a todos a partilha do saber e as valiosas contribuições neste trabalho.

Agradeço também ao Eng. António José da Fonseca Festas pelo seu contributo na fase de desenvolvimento do protótipo.

Deixo um agradecimento muito especial à minha namorada, Marta Gonçalves, ouvinte atenta de algumas dúvidas, inquietações, desânimos e sucessos. Que sempre esteve presente com o apoio, confiança e valorização que tanto me ajudaram.

Estou muito grato a todos os meus amigos e colegas, por toda a amizade e apoio que desde sempre demonstraram, especialmente aqueles com quem vivi um ambiente de verdadeira aprendizagem colaborativa, durante o desenvolvimento desta Dissertação.

Por último, um profundo e sincero agradecimento aos meus Pais e Irmão, pelo amor, pelo inestimável apoio familiar, por sempre me incentivarem perante os desafios, a fazer mais e melhor, pela paciência e compreensão reveladas ao longo destes anos. A eles dedico este trabalho!

O meu sentido agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização desta Dissertação; um muito obrigado.

Palavras-chave

Caudal de gás; Atuador; Íman permanente; Solenóide; Simulação; Eletroválvula; Modelação; Desenvolvimento; Protótipo

Resumo

Atualmente, os atuadores das válvulas responsáveis pelo doseamento do caudal de gás em equipamentos de aquecimento de água domésticos possuem funções de segurança, normalmente garantidas por uma mola. Dada a sua natureza de atuação, o elevado consumo energético é uma característica destes atuadores. Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um atuador alternativo com maior eficiência energética e um menor tempo de resposta, de forma a regular o caudal de gás com mais precisão. A solução desenvolvida consiste num solenóide convencional com um êmbolo de íman permanente, sendo possível obter um atuador bi-estável dotado de um movimento bi-direcional. O conceito desenvolvido é modelado e simulado recorrendo ao software Matlab-Simulink. De forma a comprovar a validade dos resultados em ambiente simulado, recorre-se a testes experimentais do protótipo desenvolvido também no âmbito da presente dissertação.

Keywords

Gas flow; Actuator; Permanent magnet; Solenoid; Simulation; Electrovalve; Modeling; Development; Prototype

Abstract

Currently, the actuators of the valves responsible for the gas flow assay in domestic water heating appliances have security measures, usually ensured by a spring. Given the nature of the actuation, high energy consumption is a characteristic of these actuators. In this sense, the present work aims to develop an alternative actuator with greater energy efficiency and a lower response time in order to regulate the gas flow more accurately. The developed solution consists of a conventional solenoid with a permanent magnet plunger, thus it is possible to obtain a bistable actuator with bi-directional movement. The developed concept is modeled and simulated using the Matlab-Simulink software. In order to prove the validity of the simulation results, experimental tests with a prototype are also developed.

Conteúdo

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia empregue	4
2	Revisão do estado da arte	5
2.1	Princípios de funcionamento	5
2.1.1	Eletroválvulas on/off	5
2.1.2	Eletroválvulas proporcionais	7
2.1.3	Eletroválvulas estranguladoras de caudal	7
2.1.4	Eletroválvulas reguladoras de caudal	9
2.2	Tipos de atuação	9
2.2.1	Eletromagnética	9
2.2.2	Elétrica	13
2.2.3	Piezoelétrica	14
2.2.4	Térmica	15
2.2.5	Atuação não - convencional	16
2.3	Quadro resumo	18
2.4	Conclusão	18
II	Modelação e simulação de sistemas de atuação	21
3	Pré-estudo e soluções possíveis	23
3.1	Área de passagem de fluido	23
3.1.1	Especificações técnicas de equipamentos	23
3.1.2	Cálculo do caudal mássico	23
3.1.3	Fluxo de um fluido compressível	24
3.1.4	Conclusão	27
3.2	Possíveis sistemas de atuação	28
3.2.1	Atuação eletromagnética	28
3.2.2	Atuação piezoelétrica	30
3.2.3	Conclusão	34

4	Modelação dos sistemas propostos	35
4.1	Sistema proposto I	35
4.2	Sistema proposto II	37
4.3	Sistema proposto III	40
4.3.1	Descrição do sistema implementado	40
4.3.2	Modelo Elétrico	42
4.3.3	Modelo Magnético	43
4.3.4	Modelo Mecânico	49
4.3.5	Máquina de estados	50
4.3.6	Modelo Fluídico	51
4.4	Sumário	52
4.4.1	Especificações do modelo	54
4.5	Implementação em Simulink	55
III	Desenvolvimento e protótipo da válvula	57
5	Otimização de parâmetros e análise de resultados do modelo	59
5.1	Metodologia de otimização	59
5.2	Análise de resultados do modelo otimizado	65
6	Desenvolvimento do protótipo	69
6.1	Modelação e desenhos de fabrico	69
6.1.1	Proposta concetual	69
6.1.2	Proposta simplificada	71
6.2	Prototipagem	72
6.3	Driver de potência da eletroválvula	73
IV	Resultados e Discussão	79
7	Metodologia experimental	81
7.1	Resultados obtidos	82
8	Conclusões e proposta de trabalhos futuros	83
8.1	Conclusões	83
8.2	Trabalhos futuros	84
	Anexos	93
A	Desenhos de Fabrico - Proposta conceptual	95
B	Desenhos de Fabrico - Proposta simplificada	99

Lista de Tabelas

2.1	Classificação das válvulas baseada em tipos de atuação	9
2.2	Micro-válvulas de atuação convencional	18
3.1	Vulcano - Esquentador_Sensor_HDG_6720680231_09 - [45]	24
3.2	Vulcano - Esquentador_Iteligente_Compacto_WB - [46]	24
3.3	Valores de queda de pressão	26
3.4	Valores das áreas de passagem de fluido para diferentes ΔP	27
3.5	Valores de deslocamento do êmbolo	28
3.6	Anel piezo - [49]	32
3.7	Diâmetro da câmara de amplificação	32
3.8	Piezo Atuador - [50]	33
4.1	Especificações do modelo	54
5.1	Valores de dimensões iniciais	60
5.2	Valores retirados da Figura 5.2	61
5.3	Valores retirados da Figura 5.3	63
5.4	Resumo dos parâmetros geométricos - Figura 5.1	65

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de atuação - Normalmente fechada	6
2.2	Diagrama de atuação - Normalmente aberta	6
2.3	Diagrama de atuação - Biestável	7
2.4	Esquema de controlo em malha fechada simples - Retirada de [2].	7
2.5	Ilustração - Vena contracta - Retirada de [4].	8
2.6	Curvas de pressão e velocidade - Retirada de [3]	8
2.7	Esquema de uma válvula	10
2.8	Dependência da posição do êmbolo - Retirada de [8]	10
2.9	Corte transversal da válvula - Retirada de [10]	11
2.10	Geometria básica de uma válvula de fluxo magnético- Retirada de [11]	11
2.11	Configuração da micro-válvula Yanagisawa <i>et al</i> - Retirada de [12]	12
2.12	Configuração da micro-válvula Ren e Gerhard - Retirada de [14]	12
2.13	Corte transversal do atuador (dimensões em mm)- Retirada de [15]	13
2.14	Configuração da micro-válvula - Retirada de [17].	14
2.15	Válvula piezoelétrica amplificada hidraulicamente - Retirada de [24]	15
2.16	Corte transversal da válvula termopneumática - Retirada de [26]	15
2.17	Configuração da micro-válvula - Retirada de [30].	16
2.18	Esquematização da válvula de Hidrogel - Retirada de [31]	17
3.1	Configuração do orifício padrão - Retirada de [4]	25
3.2	Fator de expansão - [4]	26
3.3	Exemplo de orifício e estrutura de uma válvula - Retirada de [4]	27
3.4	Sistema proposto 1	29
3.5	Sistema proposto 2	29
3.6	Sistema proposto 3	30
3.7	Amplificação baseada numa pilha de cristais piezoelétricos - [47]	31
3.8	Amplificação baseada em tiras de material piezo encastradas - [48]	31
3.9	Atuador de anel NAC2121 - [49]	31
3.10	Esquema de amplificação hidráulica	32
3.11	Sistema piezoelétrico proposto 1	33
3.12	FlexFrame PiezoActuator - [50]	33
3.13	Sistema piezoelétrico proposto 2 - [51]	34
4.1	Válvula solenóide - [52]	36
4.2	Corte transversal de um solenóide com êmbolo de íman permanente - [54]	37
4.3	Espira circular percorrida por uma corrente I - [54]	38
4.4	Características geométricas do solenóide com íman permanente - [54]	38

4.5	Diferentes tipos de armação - Retirada de [56]	40
4.6	Ilustração do modelo com armação tubular e íman permanente	41
4.7	Sub-modelos da eletroválvula	41
4.8	Circuito equivalente do solenóide	42
4.9	Caminho do fluxo magnético	43
4.10	Circuito equivalente - íman permanente	44
4.11	Circuito equivalente - enrolamento	46
4.12	Grandeza do campo magnético no interior de um solenóide - [57]	47
4.13	Curva força de atração - distância	48
4.14	Diagrama de corpo livre	49
4.15	Diagrama de estados da eletroválvula	51
4.16	Área de passagem do fluido	51
4.17	Ilustração - características geométricas	52
4.18	Ilustração de um corte transversal do enrolamento	53
4.19	Diagrama de blocos - Simulink	55
5.1	Características geométricas do modelo em estudo	60
5.2	Relação entre força do solenóide, número de espiras e resistência.	61
5.3	Relação entre número de espiras, área de secção do enrolamento e diâmetro do fio de cobre.	62
5.4	Comparação do desempenho entre as combinações com mais potencial	63
5.5	Relação entre espessura da armação, altura do núcleo e força do solenóide	64
5.6	Comparação entre o antes e o após a otimização	64
5.7	Intensidade de corrente e força do solenóide	65
5.8	Força do solenóide e deslocamento	66
5.9	Deslocamento e força de atração do íman permanente	66
5.10	Forças presentes no sistema	67
6.1	Fotorrealismo da eletroválvula	69
6.2	Corte transversal	69
6.3	Vista explodida	70
6.4	Vista explodida dos componentes a prototipar	71
6.5	Comparação entre modelo 3D e protótipo	72
6.6	Vista geral dos componentes prototipados	72
6.7	Sinal de tensão teórico	73
6.8	Driver de potência da eletroválvula	74
6.9	Sinal de onda obtido em ambiente simulado	74
6.10	Circuito do driver de alimentação	75
6.11	Sinal de onda obtido	75
6.12	Driver de potência da electroválvula corrigido	76
6.13	Circuito do driver de alimentação corrigido	76
6.14	Sinal de onda atual	77
6.15	Otimização do <i>driver</i> da válvula	77
7.1	Diagrama de funcionamento do atuador	81
7.2	Análise do campo magnético entre o íman permanente e material ferromagnético nas duas posições estáveis	82

Glossário

- F_s Força do solenóide. 10, 39
- μ_0 Permeabilidade magnética do vazio. 10
- A_{gap} Área do *gap* do solenóide. 10
- f Fator de fuga do fluido. 10
- I Intensidade de corrente. 10, 36, 37, 38, 39, 42, 45, 46, 52, 53, 62
- I_0 Intensidade de corrente do solenóide. 10
- x Espaçamento entre o êmbolo e o núcleo ferromagnético. 10
- l_e Relutância equivalente. 10
- N Número de espiras da bobina. 10, 37, 39, 42, 45, 46, 52, 53, 62
- F_e Força eletrostática. 13
- ε Constante dielétrica do material. 13
- ε_0 Constante dielétrica do vazio. 13
- A Área da superfície. 13
- V Tensão aplicada. 13, 36, 42, 52, 53
- V_{PI} Tensão de atuação. 13
- k Constante da mola. 13, 37
- d Distância entre as superfícies. 13
- \dot{m} Caudal mássico de gás. 23
- C_d Coeficiente de descarga. 24
- Y Fator de expansão. 24
- A_t Área de passagem de fluido. 24
- ρ_1 Densidade do fluido à entrada da válvula. 24
- P_1 Pressão à entrada da válvula. 24

P_2 Pressão à saída da válvula. 24
 β Fator de geometria da válvula. 24
 R Resistência do enrolamento. 36, 42, 52, 53, 62
 λ Fluxo magnético articulado. 36, 42
 L Indutância do enrolamento. 36, 37
 F_{mag} Força magnética. 36, 37
 R' Relutância total do enrolamento. 37
 d Diâmetro do tubo guia. 37
 a Comprimento do metal condutor de fluxo magnético. 37
 g Espessura do tubo guia. 37
 M Massa do êmbolo. 37, 50
 g_r Aceleração gravitacional. 37, 50
 b Coeficiente de atrito dinâmico. 37, 50
 B_{sol} Campo magnético gerado pelo solenóide. 38, 39
 n Número de espiras por unidade de comprimento do solenóide. 38
 z_p Distância do ponto P ao centro do solenóide. 38, 39
 B_r Magnetismo residual. 39, 44, 45, 52
 M_{mag} Magnetização. 39, 44, 47
 $V(\phi)$ Tensão induzida. 42
 $\phi(i, x)$ Fluxo magnético total. 42, 43, 52
 $L_{sol}(i, x)$ Indutância não linear do solenóide. 42, 46, 52
 $B(i, x)$ Campo magnético total. 43
 $B_{sol}(i, x)$ Campo magnético do solenóide. 43, 47
 $B_{iman}(i, x)$ Campo magnético do íman permanente. 43
 $\phi_{sol}(i, x)$ Fluxo magnético do solenoide. 43, 45, 46, 47
 $\phi_{iman}(i, x)$ Fluxo magnético do íman permanente. 43, 44, 45
 F_m Força magneto-motriz do íman permanente. 44
 R_{iman} Relutância magnética do íman permanente. 44, 45
 R_x Relutância magnética entre o íman e o núcleo ferromagnético. 44, 45

R_a Relutância magnética entre topo do íman e armação. 44, 45
 H_c Coercitividade do íman permanente. 44
 l_m Comprimento do íman permanente. 44, 45
 A Área do topo do solenóide. 45
 l_a Espaçamento em vazio entre o topo do êmbolo e o corpo do solenóide. 45
 R_g Relutância entre o êmbolo e a armação do solenóide. 45
 l_g Distância entre o íman permanente e a armação do solenóide. 45, 46, 52
 $F_{sol}(i, x)$ Força devida ao solenóide. 47, 49, 53, 62
 \ddot{x} Aceleração do êmbolo. 49, 53
 F_a Força de atrito. 49, 50, 53
 F_{est} Força de atrito estático. 50
 μ_{est} Coeficiente de atrito estático. 50
 F_{din} Força de atrito dinâmico. 50

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Nos últimos anos tem-se assistido a um significativo aumento do grau de exigência relativamente à qualidade no conforto das habitações. Estas deixaram o seu papel simplista de “local para viver” evoluindo para espaços de conforto nos quais os seus utilizadores possam desfrutar de todas as condições de comodidade e segurança.

A inevitável busca pelo conforto humano está diretamente relacionada com a sua necessidade de água quente no uso doméstico. Grande parte da população mundial não dispensa este bem, existindo uma grande gama de equipamentos, tais como esquentadores a gás, bombas de calor ou termoacumuladores elétricos.

No que toca a equipamentos alimentados a gás, o fluxo deste em aquecimento de águas domésticas é regulado através de eletroválvulas. De entre as eletroválvulas utilizadas destacam-se as eletroválvulas que modelam a secção de um orifício de passagem de gás, proporcionalmente a um sinal elétrico e outras que atuam de uma forma on/off. As eletroválvulas on/off utilizam normalmente solenóides para comutar a posição da válvula contrariando a força de uma mola. A ação de comutação e manutenção da abertura/fecho da válvula necessita de energia que, dependendo da dimensão da válvula e da força necessária para a manter na posição atuada, pode ser considerável para algumas aplicações com limitações de energia disponível. Esta energia, nos esquentadores mais modernos, é normalmente assegurada por pilhas. Pilhas estas, que apresentam metais tóxicos perigosos para a saúde humana e para o meio ambiente. Neste sentido, um consumo energético reduzido, assume vantagens não só na vertente da eficiência, como também na redução do impacto ambiental.

Surge assim a principal necessidade: uma eletroválvula capaz cumprir a sua função, dentro das referentes normas de segurança, sem esquecer os requisitos impostos, como dimensões e consumo energético reduzido e, ainda, comutação rápida entre estados, na ordem dos milissegundos, culminando numa performance elevada do equipamento.

O estudo de todas as envolventes no desenvolvimento de um sistema funcional e eficiente a nível energético é desafiante e motivador, pois a tecnologia está em constante evolução, fazendo parte do presente e do nosso futuro.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo o estudo, desenvolvimento, prototipagem e teste funcional do conceito de uma eletroválvula on/off de gás, para aplicação em instalações ou equipamentos de produção de água quente. A válvula a desenvolver deve obedecer às seguintes especificações:

- Válvula de duas posições, monoestável ou biestável.
- Dimensões reduzidas.
- Tempos de resposta reduzidos.
- Consumos energéticos baixos.

Para isso foram estabelecidas etapas dentro do objetivo geral, que é obter um protótipo de uma válvula on/off. Essa válvula deverá ser posteriormente testada e comparado o seu desempenho relativamente a eletroválvulas on/off existentes no mercado, com especificações equivalentes.

1.3 Metodologia empregue

Com o intuito de cumprir com os objetivos propostos, é definida uma abordagem composta por várias etapas.

A primeira etapa passa, então, por uma pesquisa acerca dos vários tipos de atuação já existentes com potencial para implementação em eletroválvulas on/off, e definição de um conceito para a válvula a desenvolver.

A etapa seguinte consiste em modelar a componente dinâmica do conceito desenvolvido na tarefa anterior em Simulink, de modo a testar a sua viabilidade, avaliar o seu comportamento, e ainda otimizar o seu desempenho dinâmico e estático.

Por último, realizar-se-á um estudo dos processos de conceção e fabrico de um protótipo funcional de uma eletroválvula on/off, e os testes funcionais em situações reais de modo a poder comparar os resultados com o modelo virtual simulado, validando assim o modelo e o protótipo desenvolvidos.

Capítulo 2

Revisão do estado da arte

As eletroválvulas de controlo, são componentes cada vez mais importantes na indústria moderna, em todo o mundo.

Atualmente, a regulação de passagem e da pressão de gases e outros fluidos, facultada pelas eletroválvulas, está fortemente relacionada com a área de controlo de processos industriais. Devidamente selecionadas, estas contribuem para um aumento da eficiência, segurança e rentabilidade dos equipamentos e dos processos.

São diversos os sistemas propostos para a regulação de fluidos em estado gasoso, que se classificam consoante o princípio de funcionamento e tipo de atuação.

2.1 Princípios de funcionamento

Devido às suas múltiplas funções, há uma grande variedade de tipos de válvulas, cuja escolha adequada está dependente das características de operação, da natureza do fluido e ainda das condições de pressão e temperatura.

As válvulas possuem um modo de operação específico para cada tipo; porém, o principal fator de distinção entre elas é o princípio de funcionamento, que consiste na sua abertura e fecho, de forma a controlar o fluxo de um fluido, seja ele um gás ou um líquido.

Este controlo define a área de passagem do fluido, que pode ser fixa, como no caso das eletroválvulas on/off [2.1.1], ou variável, como por exemplo nas eletroválvulas proporcionais [2.1.2], estranguladoras de caudal [2.1.3] e reguladoras de caudal [2.1.4].

2.1.1 Eletroválvulas on/off

Como o nome sugere, válvulas on/off são aquelas que estão sempre numa de duas posições, totalmente aberta ou totalmente fechada, sem a capacidade de regular através de uma gama de deslocamentos.

Veja-se, por exemplo, as válvulas que recorrem a atuação por solenóide, como explicado em [2.2.1]. Um dos dois estados ocorre no instante em que a bobina é energizada e outro quando a válvula se encontra em repouso (livre de energização). Surge assim a distinção entre válvulas normalmente fechadas e normalmente abertas, como discutido adiante.

Normalmente fechada

Numa válvula normalmente fechada não ocorre passagem de fluido enquanto esta se encontra na posição de repouso, posição fechada. A válvula abre quando é energizada, e no momento em que é interrompida a energização, uma mola isolada no seu interior é responsável pelo fecho. A força electromagnética proveniente do solenóide deve vencer a força da mola de forma a abrir a válvula. Caso contrário, a força da mola mantém a válvula fechada. No caso de uma falha de energia, a válvula fecha-se automaticamente por ação da mola, o que pode ser interessante em termos de segurança.

Em termos de consumos energéticos, para manter a passagem de fluido é necessário manter a bobina alimentada, Figura 2.1.

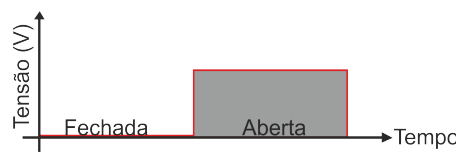


Figura 2.1: Diagrama de atuação - Normalmente fechada

Normalmente aberta

Pelo contrário, uma válvula normalmente aberta permite a passagem de fluido na sua posição de repouso. Fecha quando é energizada, e no momento que a corrente é desligada uma mola é responsável pela abertura da válvula. Da mesma forma, a força electromagnética deve vencer a força da mola pela mesma razão anteriormente exposta.

Assim, para a válvula permanecer fechada nesta posição é necessário alimentar continuamente a bobina, Figura 2.2.

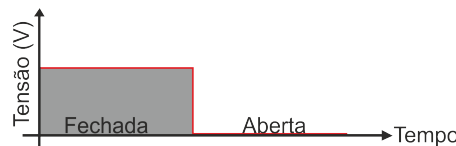


Figura 2.2: Diagrama de atuação - Normalmente aberta

Biestável

Uma desvantagem dos tipos de funcionamento anteriores, são os consumos energéticos devido à necessidade de aplicar uma corrente aos terminais da bobina continuamente, de forma a manter abertas as válvulas normalmente fechadas e vice-versa.

Com recurso a outros mecanismos, nomeadamente ímanes permanentes, entre outros, é possível alcançar um funcionamento biestável, que permite à válvula permanecer em qualquer estado indefinidamente sem alimentação contínua de corrente. Posto isto, a atuação biestável pode ser uma solução para os elevados consumos energéticos, visto que necessita de uma tensão à bobina apenas para comutar o estado entre duas posições estáveis, Figura 2.3.

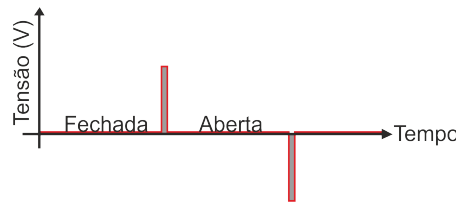


Figura 2.3: Diagrama de atuação - Biestável

O resultado é um consumo de energia significativamente mais baixo. Ainda como vantagem, o aumento da temperatura da bobina é menor, dado que o tempo que permanece energizada é significativamente inferior, resultando numa maior vida útil.

2.1.2 Eletroválvulas proporcionais

A palavra proporcional pode ser usada para descrever qualquer parâmetro com variação proporcional a outro.

As válvulas proporcionais são válvulas de controlo dinâmico, capazes de posicionar o órgão móvel em infinitas posições entre os limites inicial e final, proporcionando uma variação contínua em caudal ou pressão, em resposta a um sinal elétrico [1].

Compreendem dois tipos de controlo: o controlo em malha fechada ou o comando em malha aberta. O comando em malha aberta recorre ao equilíbrio dinâmico e calibração do sistema, de forma a fornecer uma saída proporcional e repetível, sem recorrer à monitorização das grandezas desejadas à saída da válvula. O controlo em malha fechada, quando combinado com sensores adequados a jusante, possibilita um modo fácil de controlo, permitindo à válvula ser extremamente precisa.

A Figura 2.4 mostra um circuito de controlo em malha fechada. A unidade de controlo recebe um *feedback* sobre o valor real da variável controlada, comparando este com o valor de referência. Calcula o desvio do sistema e extrapola a variável manipulada, que é transmitida ao atuador. Este reajusta a posição do êmbolo e reduz o desvio [2].

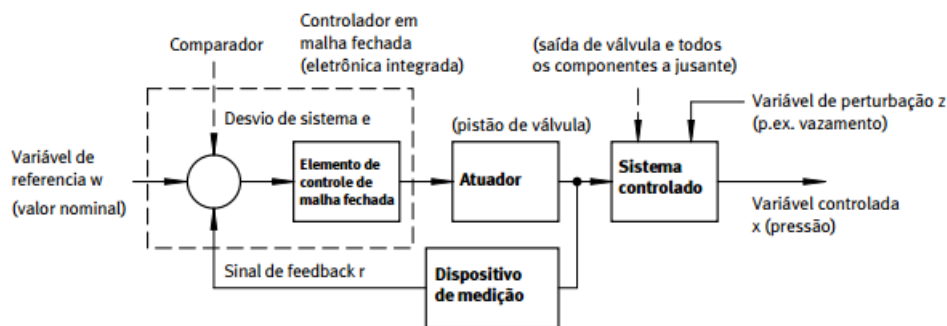


Figura 2.4: Esquema de controlo em malha fechada simples - Retirada de [2].

2.1.3 Eletroválvulas estranguladoras de caudal

As eletroválvulas estranguladoras são tipicamente usadas como dispositivos de controlo de fluido. Tais válvulas estão sujeitas a gradientes de velocidade e pressão, e com-

preendem, na sua essência, uma queda de pressão permanente entre a entrada e a saída [3].

A diferença de pressão (ΔP) determina o caudal que passa através do estrangulamento. Nos sistemas com diferentes cargas (variação da pressão de entrada), o fluxo à saída da válvula será sempre diferente para diferentes pressões.

Ao contrário das eletroválvulas on/off, que estão sujeitas às variações de velocidade de escoamento apenas quando comutadas, as válvulas estranguladoras de caudal estão sob influência deste gradiente de pressão quase na totalidade do tempo de operação.

O Princípio de Bernoulli é o mais útil para analisar o comportamento físico interno da válvula, traduzindo o Princípio da Conservação da Energia.

Outro contributo, não menos importante, é o da Primeira Lei da Termodinâmica que compreende o estado físico do fluido e os efeitos térmicos [3].

A geometria das eletroválvulas compreende um ponto em que o jato de fluido atinge um diâmetro menor e uma velocidade de escoamento máxima, designado por Vena Contracta. Ocorre geralmente a jusante de uma secção transversal pequena, como representado na Figura 2.5. Quando os gradientes de velocidade e pressão são graficamente apresentados, acaba-se com uma curva bastante típica, Figuras 2.6a e 2.6b, [4].

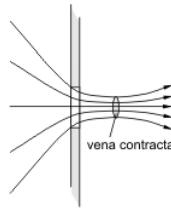


Figura 2.5: Ilustração - Vena contracta - Retirada de [4].

O diâmetro da Vena Contracta é dependente da geometria da válvula. Um parâmetro importante na determinação da pressão neste ponto, é o fator de ganho de pressão do fluido, F_L (conversão da pressão dinâmica em pressão estática do orifício principal da válvula).

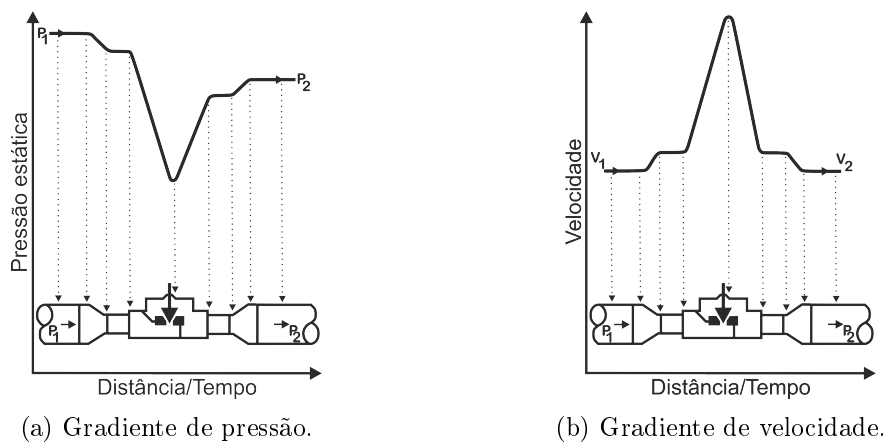


Figura 2.6: Curvas de pressão e velocidade - Retirada de [3]

2.1.4 Eletroválvulas reguladoras de caudal

Uma válvula de controlo de caudal com compensação de pressão fornece uma resposta a variações de pressão, abrindo e fechando o orifício de passagem. Deve satisfazer uma procura a jusante, fornecendo um caudal específico de fluido independentemente da variação de pressão, ΔP .

Quando o caudal necessário é baixo, o elemento regulador aproxima-se do seu encosto e restringe a passagem. Quando o caudal pretendido aumenta, o elemento regulador afasta-se da vedação provocando uma maior abertura e aumento do caudal [5].

2.2 Tipos de atuação

Em qualquer sistema, os atuadores são elementos funcionais que controlam um determinado processo.

Desde que foi inventado o primeiro circuito integrado por Kilby em 1958 (vencedor do Prémio Nobel da Física em 2000) [6], a miniaturização tem-se tornado um tópico importante de investigação e de industrialização. Durante as últimas duas décadas, estes sistemas sofreram uma redução de dimensões, consumos e tempo de resposta. Atualmente as válvulas podem ser categorizadas como exposto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação das válvulas baseada em tipos de atuação

Categorias		
Convencional	Eletromagnética	
	Elétrica	Eletrostática
	Piezoelétrica	
	Térmica	Bimetálica
		Termopneumática
		Ligas com memória de forma - SMA
Não - convencional	Eletroquímica	
	Mudança de fase	Hidrogel
		Sol - gel
		Parafina
	Reológicas	Electro-reológicas Ferrofluidos

2.2.1 Eletromagnética

O eletromagnetismo surge com a passagem de corrente elétrica através de um material condutor. São geradas forças de atracção ou de repulsão, proporcionais ao fluxo de corrente.

Os campos eletromagnéticos surgem e desaparecem rapidamente, permitindo assim dispositivos com velocidades de operação elevadas. Uma vez que os campos eletromagnéticos são sensíveis ao aumento da temperatura, o desempenho destes atuadores é limitado principalmente pelas propriedades dos materiais utilizados na sua construção.

As eletroválvulas recorrem geralmente a um solenóide como atuador. Estas resultam da combinação de três componentes principais: o enrolamento, o corpo da eletroválvula, e o órgão móvel (normalmente um êmbolo) [7], como se pode ver na Figura 2.7.

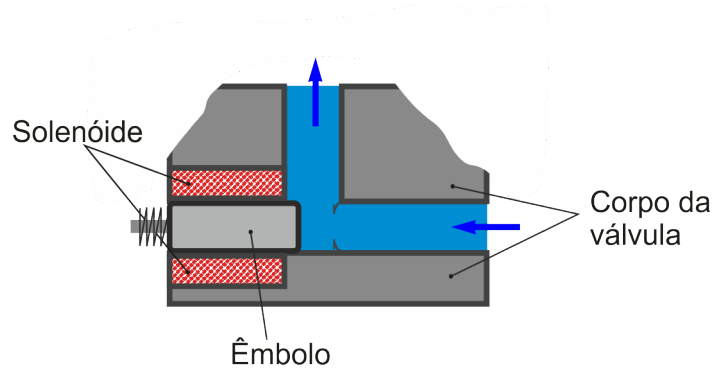


Figura 2.7: Esquema de uma válvula

A intensidade de corrente que percorre a bobina gera um campo magnético, e por sua vez uma força magnética forçando o órgão móvel a movimentar-se.

A força de um solenóide convencional é altamente dependente da posição do êmbolo, devido ao espaçamento entre o êmbolo e o núcleo ferromagnético, que pode ser visto como uma resistência ao fluxo magnético (relutância), Figura 2.8, [8].

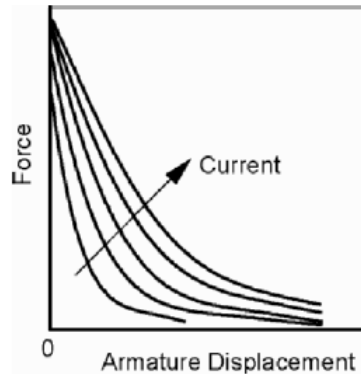


Figura 2.8: Dependência da posição do êmbolo - Retirada de [8]

A Equação 2.1 expressa a força gerada por um solenóide, quer em eletroválvulas on/off como proporcionais. Se esta força for suficiente para comutar a posição do êmbolo, é válido o controlo do caudal através de um atuador electromagnético [9].

$$F_s = \frac{\mu_0 A_{gap}}{2f} \left(\frac{I - I_0}{x - l_e} \right)^2 N^2 \quad (2.1)$$

Em 1979 foi realizada a miniaturização de uma válvula eletromagnética recorrendo a um êmbolo, fisicamente ligado a uma membrana micro maquinada de silício por Terry *et al* [10], sendo a primeira válvula ativa micro maquinada, parte integrante de uma sistema de cromatografia a gás, como ilustrado na Figura 2.9.

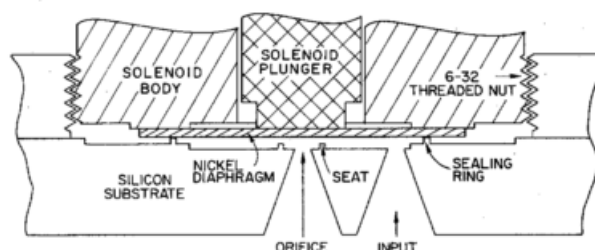


Figura 2.9: Corte transversal da válvula - Retirada de [10]

Um outro exemplo de dispositivo de atuação eletromagnética, descrito por Smith *et al* [11], consiste num êmbolo de material magnético que é posicionado no canal do fluxo entre dois corpos de silício micro maquinado, como ilustrado na Figura 2.10.

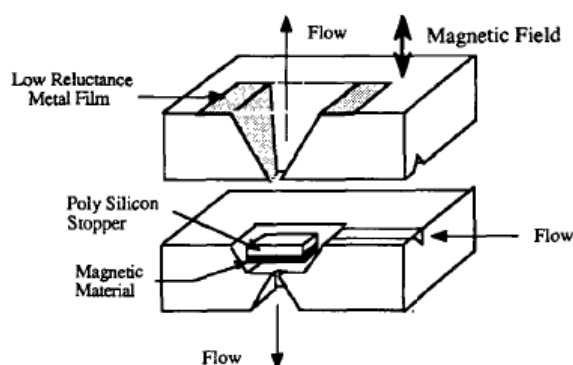


Figura 2.10: Geometria básica de uma válvula de fluxo magnético- Retirada de [11]

Yanagisawa *et al* [12] construíram uma micro-válvula com uma membrana fina ($2\mu m$ de espessura) de NiFe suportada por uma mola, dentro da tubagem, e um solenóide montado do lado de fora. Funciona como um regulador de gás acionado por uma frequência entre 0,1 e 100 Hz ; como resultado, fornece um fluxo entre 66 e 5140 L/min a uma pressão de entrada de $3,5 \times 10^{-12} kPa$, Figura 2.11.

Uma combinação entre a utilização de um solenóide e um íman permanente é apresentada Shinozawa *et al* [13]. As dimensões da válvula, incluindo o atuador, rondam os $5 \times 5 \times 5 mm$. Um pequeno íman permanente é acoplado a uma agulha que interrompe a passagem de caudal, sendo a agulha controlada pela força eletromagnética proveniente do enrolamento colocado externamente à passagem do fluido.

Ren e Gerhard [14] fabricaram um atuador biestável composto por um condutor magnético com dois polos, um enrolamento, uma barra encastrada flexível com propriedades condutoras e um íman permanente, como ilustrado na Figura 2.12. Aplicando-se um impulso de corrente nos enrolamentos, a barra encastrada é excitada e deflete, movendo-se de uma posição de repouso para outra. Com um espaçamento entre os dois polos do

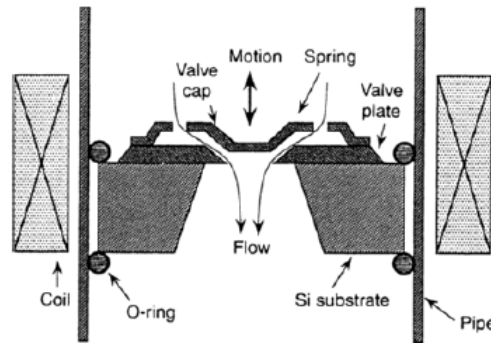


Figura 2.11: Configuração da micro-válvula Yanagisawa *et al* - Retirada de [12]

condutor magnético de $100\ \mu\text{m}$ é necessário um impulso de corrente de $1,25\text{A}$ com a duração de $0,3\text{ms}$, num enrolamento com 60 espiras, para gerar uma força de fecho de 5mN , com um tempo de resposta relativamente baixo.

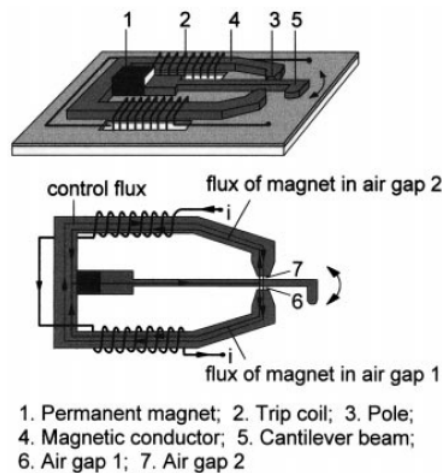


Figura 2.12: Configuração da micro-válvula Ren e Gerhard - Retirada de [14]

Bohm *et al* [15] desenvolveram uma micro-válvula eletromagnética biestável, Figura 2.13. Esta inclui um ímã permanente NeFeB, um solenóide com 800 espiras e uma mola proporcionando um deslocamento de $200\ \mu\text{m}$. Quando uma corrente positiva é aplicada ao solenóide, a força de retenção provocada pelo ímã é reduzida, e consequentemente a mola move o êmbolo para uma posição inferior e fecha a válvula. Um impulso de corrente em sentido inverso abre a válvula.

Bosh *et al* [16] combinaram a atuação eletromagnética e eletrostática numa micro-válvula de silicone biestável para a regulação do caudal de gás. É aplicada uma força magnética na membrana, no instante em que é aplicada uma intensidade de corrente de $200\ \text{mA}$, enquanto uma tensão eletrostática de $30\ \text{V DC}$ é necessária para manter a válvula fechada. Esta pode operar a uma pressão de entrada de $16\ \text{kPa}$ e um caudal de $3\ \text{ml/min}$.

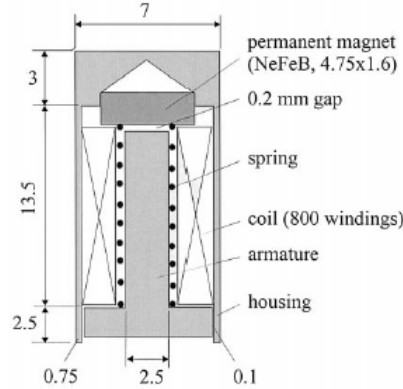


Figura 2.13: Corte transversal do atuador (dimensões em mm)- Retirada de [15]

2.2.2 Elétrica

A força eletrostática gerada entre dois condutores depende do espaçamento entre as superfícies e da tensão aplicada, Equação 2.2.

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 A \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (2.2)$$

A tensão de atuação é a tensão necessária para unir as duas superfícies, e deve ser no mínimo suficiente para vencer a constante de elasticidade da membrana, Equação 2.3.

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{k d^3}{\epsilon A}} \quad (2.3)$$

As forças eletrostáticas são normalmente pequenas e, por isso, são aplicadas tensões altas e distâncias pequenas entre as superfícies condutoras. Posto isto, é necessário um cuidado acrescido, pois distâncias muito pequenas podem limitar o desempenho da micro-válvula devido à queda de pressão associada a esta característica.

Shikida *et al* [17] apresentaram uma micro-válvula baseada numa construção em camadas, tendo uma película condutora entre dois elétrodos planares com um espaçamento de 2,5 mm entre eles. A película de 5 µm de espessura, é composta por uma liga de NiFe com uma dobra em forma de S que avança e recua proporcionalmente à tensão aplicada alternadamente entre os elétrodos e a película, Figura 2.14b. Para uma tensão de 150 V, a velocidade de propagação é de 4,0 m/s.

Goll *et al* [18] apresentam uma micro-válvula composta por dois elétrodos e três membranas flexíveis dispostas por camadas, sendo duas camadas exteriores isolantes separadas por uma membrana condutora entre elas. A membrana de 3 µm de espessura é atraída por uma força eletrostática para um dos elétrodos na parte superior ou inferior da câmara com um espaçamento de 25 µm, que abre ou fecha o orifício de entrada da micro-válvula. Tensões entre 60 a 150 V permitem comutar a membrana. A uma pressão de entrada de 110 kPa, apresenta um caudal de 12 ml/min. Uma micro-válvula normalmente fechada com uma placa de silício e uma membrana reguladora de pressão entre 50 e 1600 kPa, com um tempo de resposta de 1 ms, é apresentada por Schaible *et al* [19]. Wijngaart *et al* [20] simularam a utilização de uma micro-válvula com um

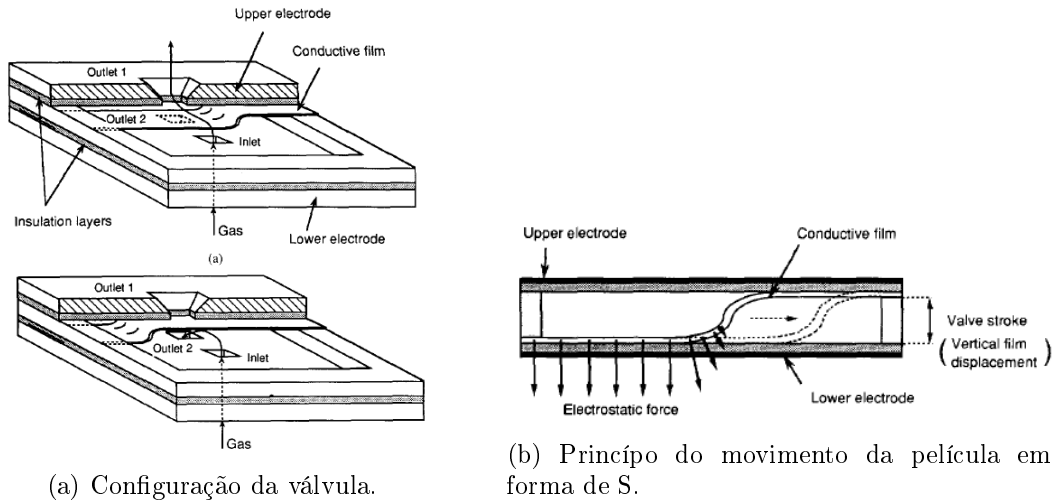


Figura 2.14: Configuração da micro-válvula - Retirada de [17].

deslocamento de atuação considerável a uma pressão de entrada de 500 kPa , assegurando uma abertura de $15 \text{ }\mu\text{m}$ com uma tensão de 366 V .

O uso de forças eletrostáticas exige normalmente tensões elevadas, proporcionando pequenos deslocamentos e pequenas forças de atuação. A grande vantagem desta arquitetura são os tempos de resposta na ordem dos ms .

2.2.3 Piezoelétrica

Os atuadores piezoelétricos usam a capacidade de certos cristais de se deformarem mecanicamente quando submetidos a uma diferença de potencial. Esta deformação está limitada a normalmente $0,1\%$ do tamanho original. Em contrapartida, exercem forças na ordem dos kN . O reduzido deslocamento de atuação é geralmente amplificado recorrendo a amplificadores hidráulicos ou mecânicos, estruturas bilaminares ou pilhas de discos piezoelétricos. Chakraborty *et al* [21] relatam que uma pilha de atuadores piezoelétricos de 10 mm de altura produz $10 \text{ }\mu\text{m}$ de deflexão.

Esta atuação apresenta uma das soluções com velocidades de comutação mais rápidas e consumo energético baixo no estado atuado, mas, tipicamente, requerem altas tensões na ordem dos 100 V [22]. Deve-se ainda ter em conta o facto de materiais piezoelétricos possuírem histerese. Micro-válvulas ativas com atuação piezoelétrica têm sido propostas por Shoji e Esashi [23], Roberts *et al* [24] e Shao *et al* [25]. Shoji e Esashi demonstram experimentalmente tempos de resposta na ordem do ms e um caudal de gás na ordem dos ml/min . O conceito proposto por Roberts *et al*, Figura 2.15, recorre a uma amplificação hidráulica de modo a aumentar o deslocamento do êmbolo, sem perder as vantagens como força e tempo de resposta reduzido.

Shao *et al* desenvolveram uma micro-válvula com um volume interno de 6 nl e um tempo de comutação de $0,7 \text{ ms}$, que fornece um caudal de 70 ml/min com um gradiente de pressão de 50 kPa .

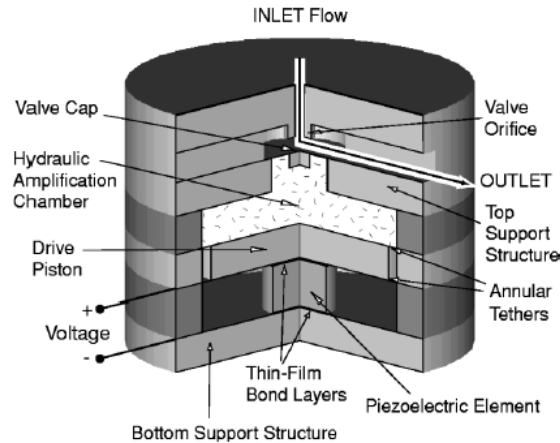


Figura 2.15: Válvula piezoelétrica amplificada hidraulicamente - Retirada de [24]

2.2.4 Térmica

Os sistemas térmicos podem ser categorizados por atuação termo-pneumática, bimetálica e ligas com memória de forma. Foram desenvolvidos atuadores termo-pneumáticos para aplicação em micro-válvulas por Zdeblick, Henning e Coworkers [26], resultando numa solução comercial fiável (Redwood microsystems). A válvula normalmente aberta, ilustrada na Figura 2.16, possui uma cavidade preenchida com Fluorinert. As dimensões do orifício variam entre 25 a 500 μm , com uma membrana de diâmetro de 6 mm. A Fluorinert é aquecida através de uma resistência de platina, defletindo a membrana da cavidade e assim fechar a válvula. O tempo de resposta varia no intervalo de 0,1 a 1 s, com um deslocamento máximo de 50 μm . A vantagem deste tipo de acionamento é a grande gama de temperaturas de funcionamento, a partir de $-20^{\circ}C$ até $70^{\circ}C$.

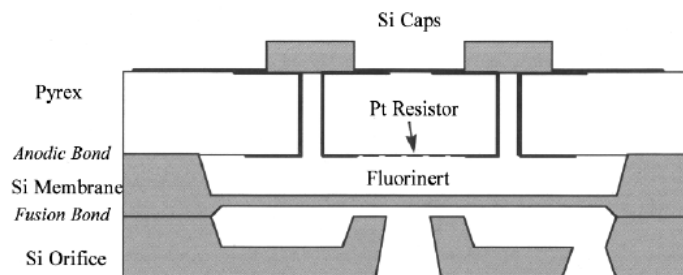


Figura 2.16: Corte transversal da válvula termopneumática - Retirada de [26]

Outro sistema de atuação térmica mencionado na literatura é o acionamento bimetálico. Estes atuadores geralmente consistem numa membrana circular de silício ligada a um anel composto por dois metais. O sistema é aquecido, provocando uma expansão térmica diferente entre os materiais e assim a membrana deflete. Jerman [27] estima que para um diâmetro do orifício de 2,5 mm, uma membrana composta por 8 μm de silício e 5 μm de alumínio, são conseguidos 25 a 30 μm de deslocamento e um tempo de resposta de 100 a 300 ms, o que permite um controlo totalmente proporcional e um caudal variável de 0 a 0,15 L/min com uma pressão de entrada entre 7 e 350 kPa. Esta

atuação mecânica é limitada no tempo de resposta e nos consumos energéticos devido aos tempos de aquecimento e arrefecimento do material bimetálico.

Este tipo de atuação possui um intervalo de operação próximo do da atuação termopneumática, sem os problemas de estanquicidade do líquido na cavidade inerentes a este último.

Por último, o efeito de memória de forma é devido a uma transformação cristalina entre altas e baixas temperaturas. A forma desejada é memorizada no material a altas temperaturas, e quando arrefece até à temperatura de transição o material é transformado numa estrutura martensítica, que pode ser facilmente deformada.

Kohl *et al* [28] desenvolveram uma micro-válvula de gás atuada por uma membrana fina de liga com memória de forma (SMA), mais especificamente NiTiPd, do tipo normalmente aberta, capaz de controlar diferenças de pressão na ordem dos 250 kPa o que corresponde a um caudal de gás de 360 ml/min com um deslocamento de $20\text{ }\mu\text{m}$. Pemble e Towe [29] miniaturizaram uma micro-válvula normalmente fechada que emprega um fio NiTi com memória de forma de $0,15\text{ mm}$ de diâmetro, de forma a controlar o fluxo de gás através de uma tubagem de silicone a uma diferença de pressões de $20,7\text{ kPa}$, permitindo um caudal de $16,8\text{ ml/min}$ com um consumo energético de 398 mW .

Os sistemas baseados em ligas com memória de forma têm a capacidade de obter grandes deslocamentos do elemento móvel; no entanto, possuem um comportamento não linear, o que torna difícil o seu controlo e apresentam tempos de resposta muito altos, na ordem dos 10 s .

2.2.5 Atuação não - convencional

Eletroquímica

Um conceito de uma válvula eletroquímica com uma membrana deflectível devido à geração de oxigénio através de eletrólise foi sugerido por Neagu *et al* [30], Figura 2.17b. Quando a micro válvula é alimentada a $1,6\text{ V}$ e $50\text{ }\mu\text{A}$ obtém-se uma pressão de 200 kPa no interior da membrana numa questão de segundos, causando uma deflexão entre 30 a $70\text{ }\mu\text{m}$, Figura 2.17a.

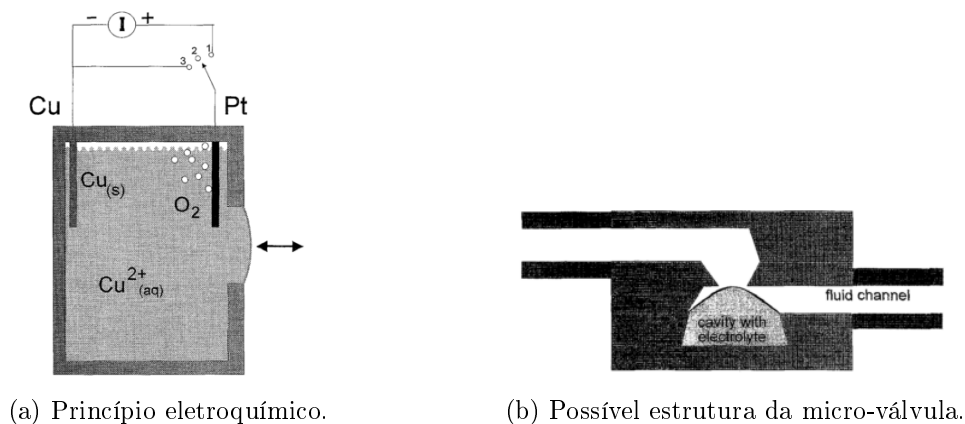


Figura 2.17: Configuração da micro-válvula - Retirada de [30].

Mudança de fase

Os sistemas de mudança de fase recorrem ao princípio de alterações dimensionais (expansão e contração) em materiais que compreendam mudanças volumétricas com mudanças de fase (sólido, líquido e gasoso). Materiais como Hidrogel, Sol-gel e Parafina são exemplos de materiais utilizados neste tipo de atuação. Dependendo do material, uma mudança de fase pode ser induzida elétrica ou termicamente, e podem ocorrer num intervalo amplo de velocidades, pressões e temperaturas.

Beebe *et al* [31] apresentaram uma válvula hidrogel para controlo do caudal no interior de micro canais respondendo a variações de pH. O atuador de hidrogel expande em contacto com uma solução com um pH de valor 11, a membrana deflecte e fecha completamente o orifício com um deslocamento de $185\ \mu m$, Figura 2.18, com um tempo de resposta de $19\ s$.

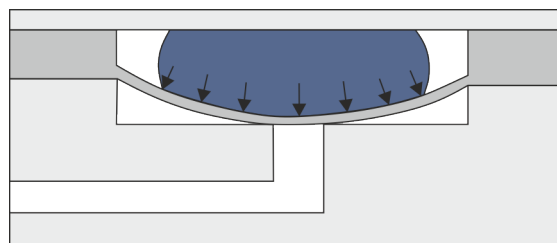


Figura 2.18: Esquematização da válvula de Hidrogel - Retirada de [31]

Transformações como mudanças de fase são, pela sua natureza, muito influenciadas pela temperatura e pressão do meio exterior. Estes sistemas de atuação requerem refrigeração de forma a reverter a transformação, sendo necessário ter em consideração as questões relacionadas com as trocas térmicas.

Os materiais submetidos a mudanças de fase geralmente exercem forças de atuação altas, e são totalmente reversíveis. Como a mudança de fase é uma propriedade do material, os dispositivos podem, em teoria, ser dimensionados consoante a necessidade de obter grandes ou pequenos deslocamentos.

Reológicas

Os materiais electro-reológicos podem ser usados em micro-válvulas não mecânicas. Estas válvulas são relativamente recentes e mais dispendiosas comparativamente às convencionais.

Fluidos eletro-reológicos cuja viscosidade é controlada por campos elétricos foram usados por Yoshida *et al* [32]. A taxa de alteração da viscosidade estática de 4,5 é obtida com uma intensidade do campo elétrico de $5,0\ kV/mm$. A taxa de alteração da pressão varia entre 0 a 60 % da pressão de alimentação, dependendo das forças do campo elétrico e o tempo de resposta é de $0,2\ s$.

2.3 Quadro resumo

A Tabela 2.2 fornece uma revisão do desempenho de algumas eletroválvulas, referentes apenas à atuação convencional com os dados que foram encontrados ao longo da presente pesquisa, [7].

Tabela 2.2: Micro-válvulas de atuação convencional

Autor	Atuação	Modo	Tipo	Fluido	Tempo resposta (ms)	On/Off		Força Pressão Deflexão	Regulação de Caudal		
						Pressão Máxima (kPa)	Potência		Caudal ($\mu\text{l}/\text{min}$)	Potência	Pressão (kPa)
Terry <i>et al</i> [10]	EM	NC	S	G							
Yanagisawa <i>et al</i> [12]	EM	NO	R	V							$7.5 \cdot 10^{-13}$
Meckes <i>et al</i> [33]	EM	NO	R	G				$0.8mN$		$0.025A$	
Krusemark <i>et al</i> [34]	EM	NC	S	G							
Fu <i>et al</i> [35]	EM	NO	R	G	10				500000	0.2A	50
Ahn's group [36]	EM	NC	R	G			0.25A				
Shikida <i>et al</i> [17]	ES	NO	R	G			200V		1000		0.1
Goll <i>et al</i> [18]	ES	NO	S	N_2			60V	$25\mu m$	12000		110
Robertson e Wise [37]	ES	NO	R	G	0.1		80V		0.87		0.75
Wijngaart <i>et al</i> [20]	ES	NC	R	Air				$15\mu m$		366V	500
Wijngaart <i>et al</i> [20]	ES	B	R	Air				$5\mu m$		24V	100
Yobas <i>et al</i> [38]	ES	NO	R	Air		82.7					
Yang <i>et al</i> [39]	ES	NC	S	N_2					45000	136V	900
Yang <i>et al</i> [39]	ES	NC	S	He							
Roberts <i>et al</i> [24]	PE	NC	R	G				$17\mu m$	12600	500V	260
Rogge <i>et al</i> [40]	PE	NC	S	N_2	2	193	245V	$50\mu m$			
Shao <i>et al</i> [25]	PE	NC	R	N_2	0.7				70000		50
Chakraborty <i>et al</i> [21]	PE	NC	S	Air				$10\mu m$			
Yang <i>et al</i> [39]	PE	NC	R	He					52000	10V	2070
Jerman [27]	BM	NC	R	N_2					150000		350
Barth	BM	NC	S	Air	200	1035			1000000	1.03W	
Rich e Wise [41]	TP	NO	S	G	1s	$7.4 \cdot 10^{-3}$	0.34W	$0.016kPa$		0.5W	
Rich e Wise[41]	TP	NO	S	G					400000		0.0113
Ruzzu <i>et al</i> [42]	TP	NO	S	G			0.04W				20
Yang <i>et al</i> [43]	TP	NO	R	N_2					1000000	0.04W	228
Kohl <i>et al</i> [28]	SMA	NO	R	G	22			$20\mu m$	360000	0.22W	250
Goll <i>et al</i> [44]	Térmica	B	S	G		47					
Bosch <i>et al</i> [16]	EM+ES	B	S	G	0.4		0.2A		3000		16

EM - Electromagnética; ES - Eletrostática; PE - Piezoelétrica; BM - Bimetálica; TP - Termopneumática; SMA - Liga memória forma; NC - Normalmente fechada; NO - Normalmente aberta; B - Biestável; S - on/off; R - Proporcional; G - Gás; V - Vácuo;

2.4 Conclusão

Ao longo desta revisão, conclui-se que o desenvolvimento de micro-válvulas está associado aos vários mecanismos de atuação e às suas aplicações.

No desenvolvimento de uma micro-válvula, são desejadas várias características, tais como: caudal de fugas reduzido ou nulo, redução do volume não útil, redução do consumo de energia, tempo de resposta baixo, operação linear, viabilidade, durabilidade e capacidade de operar com fluidos líquidos e gasosos. Para satisfazer estes requisitos têm sido exploradas várias abordagens no desenvolvimento de micro-válvulas.

A maioria das válvulas que recorre a órgãos móveis de atuação baseiam-se em métodos de atuação electromagnética, eletrostática, piezoelétrica, e térmica, entre outras

menos significativas. Válvulas convencionais para regulação de caudal e pressão empregam normalmente atuação electromagnética baseada em solenóides, de forma a impor movimento em membranas ou êmbolos, visto que são capazes de gerar grandes forças de atuação e têm tempos de resposta reduzidos, na ordem dos milissegundos. Para estruturas miniaturizadas, a atuação electroestática torna-se mais atrativa. Contudo, é difícil alcançar forças elevadas e deslocamentos grandes porque tal necessita de uma tensão de alimentação extremamente alta. A atuação piezoelétrica propõe forças de atuação elevadas, mas deslocamentos muito pequenos mesmo com tensões elevadas. A atuação térmica proporciona forças de atuação e deslocamentos consideráveis, mas apresenta uma resposta relativamente lenta devida às trocas térmicas. Em termos de consumos energéticos e no caso das válvulas do tipo on/off, a atuação biestável é preferida, visto que é necessário energizar o circuito apenas nas transições entre dois modos estáveis.

Podem ser desenvolvidas micro-válvulas sem órgãos mecânicos móveis em conjunto com atuação eletroquímica ou de mudança de fase. A atuação eletroquímica, baseada na eletrólise, proporciona grande deslocamento e deflexão com baixa tensão de entrada. A atuação devida à mudança de fase, para além das vantagens e desvantagens descritas anteriormente, apresenta também um custo relativamente baixo.

Parte II

Modelação e simulação de sistemas de atuação

Capítulo 3

Pré-estudo e soluções possíveis

Com a presente análise pretende-se avaliar os tipos de atuação com maior potencial de utilização no desenvolvimento de uma eletroválvula on/off para gás de modo a garantir o caudal mássico necessário e suficiente de gás para obtenção do nível de potência térmica desejado num dispositivo de aquecimento de águas domésticas.

Para isso, é feito um estudo sobre as pressões e caudais mássicos característicos das eletroválvulas de gás presentes em equipamentos de aquecimento de água existentes atualmente no mercado. Com isto será determinado o valor da área de passagem do fluido, ou seja, um compromisso entre o diâmetro do orifício e o deslocamento do êmbolo que proporciona a abertura da válvula.

Assim, é possível determinar o tipo de atuação que pode proporcionar a área de passagem do fluido correspondente ao caudal mássico de gás desejado. São ainda apresentadas possíveis propostas referentes ao tipo de atuação escolhido.

3.1 Área de passagem de fluido

3.1.1 Especificações técnicas de equipamentos

Após uma pesquisa acerca de equipamentos de aquecimento de água domésticos, é possível constatar que a entidade que revela os dados mais relevantes para esta análise é a Vulcano®. Assim, esta análise baseia-se maioritariamente em equipamentos desta entidade [45][46].

As Tabelas 3.1 e 3.2 contêm os dados de pressão de alimentação e consumos para os diferentes equipamentos, modelos (WTD) e gases.

3.1.2 Cálculo do caudal mássico

Para efetuar os cálculos seguintes serão utilizados os valores referentes ao gás propano. O caudal mássico por cada injetor é determinado pela Equação 3.1.

$$\dot{m} = \frac{\text{Consumo esquentador} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]}{N_{\text{injetores}}} \quad (3.1)$$

A partir da Equação 3.1 e consultando as Tabelas 3.1 e 3.2, é possível calcular seis valores distintos, sendo por isso oportuno determinar a sua média:

Tabela 3.1: Vulcano - Esquentador_Sensor_HDG_6720680231_09 - [45]

Características técnicas	Símbolo	Unidades	WTD11	WTD14	WTD18
Pressão de alimentação					
Gás natural H	G20	<i>mbar</i>	20	20	20
G.P.L. (Butano/Propano)	G30/G31	<i>mbar</i>	28-30/37	28-30/37	28-30/37
Consumos					
Gás natural H	G20	m^3/h	2.3	2.9	3.7
G.P.L. (Butano/Propano)	G30/G31	kg/h	1,7	2,2	2,75
Número de injetores			12	14	18

Tabela 3.2: Vulcano - Esquentador_Iteligente_Compacto_WB - [46]

Características técnicas	Símbolo	Unidades	WTD11	WTD14	WTD18
Pressão de alimentação					
Gás natural H	G20	<i>mbar</i>	20	20	20
G.P.L. (Butano/Propano)	G30/G31	<i>mbar</i>	30/37	30/37	30/37
Consumos					
Gás natural H	G20	m^3/h	2.3	2.9	3.7
G.P.L. (Butano/Propano)	G30/G31	kg/h	1,7	2,2	2,7
Número de injetores			12	14	18

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{\left(\frac{1,7}{12}\right) + \left(\frac{2,2}{14}\right) + \left(\frac{2,75}{18}\right) + \left(\frac{1,7}{12}\right) + \left(\frac{2,2}{14}\right) + \left(\frac{2,7}{18}\right)}{6} \\ &= 0,15 \frac{kg}{h} = 4,17 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s} \end{aligned} \quad (3.2)$$

O caudal mássico característico médio de cada injetor do esquentador, Equação 3.2, é usado como valor referência do caudal mássico através da eletroválvula a desenvolver.

3.1.3 Fluxo de um fluido compressível

Dado que o fluido circulante é um gás, ou seja, um fluido compressível, é necessária uma correção de compressibilidade porque este responde com uma redução de volume ao ser submetido à ação de uma pressão. A Equação 3.3 expressa o caudal mássico de gás que atravessa um determinado orifício, Figura 3.1 [4].

$$\dot{m} = C_d Y A_t \sqrt{\frac{2\rho_1(P_1 - P_2)}{1 - \beta^4}} \quad (3.3)$$

onde

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3.4)$$

Visto que a geometria da válvula ainda não foi definida, estima-se que $\beta = 0.7$. Neste momento é oportuno determinar os restantes parâmetros presentes na Equação 3.3.

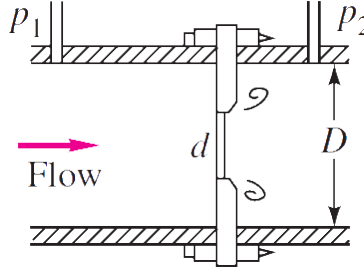


Figura 3.1: Configuração do orifício padrão - Retirada de [4]

Massa volúmica do gás Propano

A partir dos dados das Tabelas 3.1 e 3.2, é possível estimar que a pressão de alimentação de gás é 37 mbar . Visto que se trata de uma pressão relativa, o gás encontra-se à pressão absoluta de $1,05025 \text{ bar}$ como indica a Equação 3.5.

$$P = P_{atm} + 37 = 1050.25 \text{ mbar} = 1,05025 \text{ bar} \quad (3.5)$$

Recorre-se à Lei dos Gases Perfeitos, Equação 3.6, como primeira etapa na determinação da massa volúmica do propano à pressão indicada pela Equação 3.5.

$$PV = nRT \quad (3.6)$$

Sabendo que

$$\rho = \frac{m}{V} \Leftrightarrow V = \frac{m}{\rho} \quad (3.7)$$

$$M = \frac{m}{n} \quad (3.8)$$

deduz-se a Equação 3.9, que devolve a massa volúmica nas condições de pressão e temperatura requeridas.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (3.9)$$

Admitindo que o gás se encontra à temperatura ambiente, devido às trocas de calor com o meio, estima-se uma temperatura do gás propano de 20°C .

- P - Pressão do propano $1,05025 \text{ bar} = 105025 \text{ Pa}$
- M - Massa molar do propano $= 44,1 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
- R - Constante universal dos gases $= 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$
- T - Temperatura do propano $= 293,15 \text{ K}$

Assim, a massa volúmica do gás propano à temperatura ambiente e à pressão relativa de 37 mbar é

$$\rho = 1,89 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (3.10)$$

Queda de pressão do fluido no orifício

Dada a falta de informação em relação à queda de pressão na passagem do orifício, e visto que a geometria ainda não se encontra definida, estimam-se diversas perdas de pressão como 30%, 50%, e 70% da pressão de entrada relativa, como pode ser consultado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Valores de queda de pressão

ΔP	$P_1[Pa]$	$P_2[Pa]$
30%		2100
50%	3000	1500
70%		900

Coefficiente de descarga

De forma a determinar o coeficiente de descarga, C_d , recorre-se à seguinte equação [4]:

$$C_d = 0.9858 - 0.196 \cdot \beta^{4.5} = 0.946 \quad (3.11)$$

Fator de expansão

Por último, para a queda de pressão mais baixa (30%), recorre-se à Figura 3.2, de modo a determinar o fator de expansão, Y .

$$Y = 0.78 \quad (3.12)$$

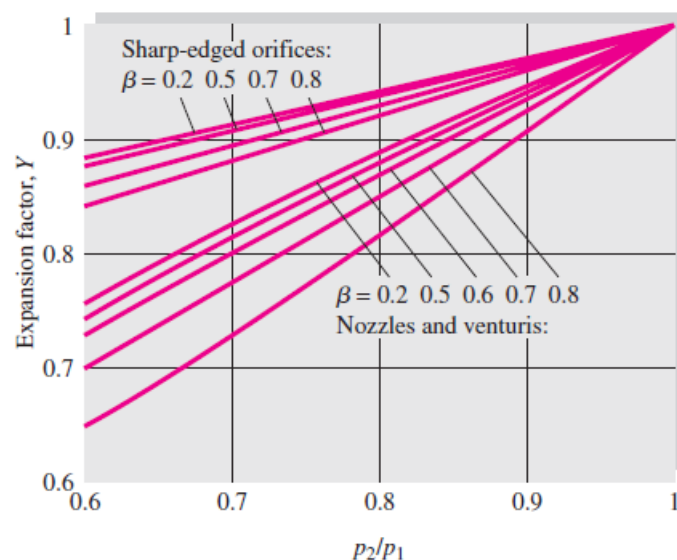


Figura 3.2: Fator de expansão - [4]

Área de passagem do fluido

A partir da Equação 3.2 é possível determinar o valor de referência do caudal de funcionamento de cada uma das flautas do queimador. Neste momento é oportuno determinar a área de passagem de fluido, A_t . A Equação seguinte, deriva da Equação 3.3.

$$A_t = \frac{\dot{m}}{C_d Y \sqrt{\frac{2\rho_1(P_1 - P_2)}{1 - \beta^4}}} \quad (3.13)$$

Para uma queda de pressão de 30%:

$$A_t = 8,45 \cdot 10^{-7} \quad m^2 = 0,845 \quad mm^2 \quad (3.14)$$

Os valores da área de passagem para as diferentes quedas de pressão são expostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Valores das áreas de passagem de fluido para diferentes ΔP .

ΔP	$P_1 [Pa]$	$P_2 [Pa]$	$A_t [mm^2]$
30%		2100	0,845
50%	3000	1500	0,654
70%		900	0,552

De forma a obter resultados o mais abrangente possível, é utilizado o valor da área de passagem do fluido mais elevado, $A_t = 0,845 mm^2$.

3.1.4 Conclusão

Assim sendo, a título exemplificativo, a Figura 3.3 representa um corte transversal de uma eletroválvula.

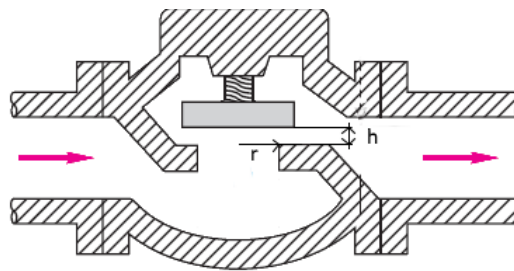


Figura 3.3: Exemplo de orifício e estrutura de uma válvula - Retirada de [4]

A Equação 3.15 representa a área superficial de um cilindro.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (3.15)$$

A Tabela 3.5 contém os deslocamentos do êmbolo correspondentes aos diferentes diâmetros do orifício. É possível, caso necessário, utilizar um deslocamento menor, aumentando o diâmetro do orifício.

Como se recorreu a diversas aproximações no decorrer do presente procedimento, utiliza-se um coeficiente de segurança, $\eta = 2$, de modo a cobrir todas as possibilidades.

$$\delta x = \eta \cdot h \quad (3.16)$$

Tabela 3.5: Valores de deslocamento do êmbolo

ϕ_{orificio} [mm]	h [μm]	δx [μm]
2	134	268
4	67	134
6	45	90

Conclui-se que é necessário recorrer a um tipo de atuação capaz de dotar o sistema de um deslocamento de 268, 134, ou 90 μm dependendo do orifício escolhido. Conclui-se também que variações no cálculo da massa volúmica traduzem diferenças insignificantes no valor da área de passagem do fluido.

3.2 Possíveis sistemas de atuação

Finalizada a Secção 3.1, sabe-se que é necessário recorrer a um tipo de atuação capaz de dotar o sistema de um deslocamento de, no mínimo, 268 μm . Recorrendo à revisão bibliográfica efetuada, há dois tipos possíveis de atuação, eletromagnética e piezoelétrica.

Este capítulo aborda ambas as possibilidades e suas aplicações, assim como os prós e contras de cada tipo de atuação.

3.2.1 Atuação eletromagnética

Como o objetivo é controlar o caudal de gás de uma forma on/off, ou seja, com uma abertura e fecho total do orifício, sem a capacidade de regular níveis intermédios, a atuação eletromagnética é capaz de prover o deslocamento necessário do êmbolo, geralmente proporcionado por um solenóide.

Este tipo de funcionamento compreende uma atuação monoestável e biestável. No caso da atuação monoestável é necessário manter a bobina alimentada para manter a passagem de caudal (normalmente fechada), que pode gerar consumos relativamente altos para algumas aplicações com limitações energéticas. Este problema pode ser resolvido por uma atuação biestável, que necessita de uma tensão aplicada à bobina apenas para comutar o estado entre as duas posições estáveis. De forma a tornar isto possível, a atuação eletromagnética deve ser integrada com outras técnicas de atuação, como, por exemplo, ímanes permanentes, o que por vezes aumenta a complexidade da eletroválvula, o que se apresenta como um inconveniente.

Sistemas propostos

De acordo com o princípio da referida atuação, foram desenvolvidas propostas de sistemas que podem ser simulados com o objetivo de testar a viabilidade de cada um para cumprir o objetivo principal deste trabalho.

A Figura 3.4 representa um sistema de funcionamento biestável, onde o ímã permanente inferior se move solidariamente com o êmbolo, sendo a mola o elemento mecânico responsável por reter o êmbolo na posição fechada. O solenóide é energizado, faz com que o êmbolo suba, e a partir de um determinado deslocamento a força eletromagnética proveniente dos ímanes permanentes mantém a válvula na posição aberta até que a bobine do solenóide seja percorrida por uma corrente em sentido inverso e mova o êmbolo para baixo.

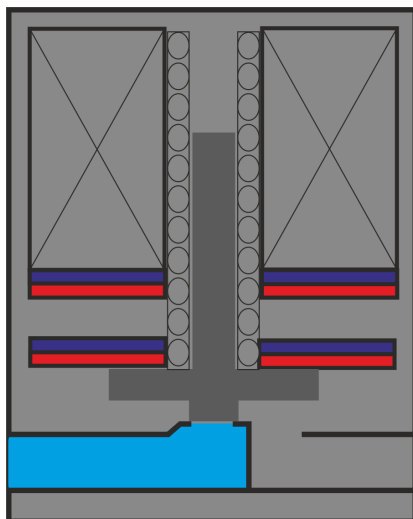


Figura 3.4: Sistema proposto 1

A Figura 3.5, de igual forma apresenta um sistema biestável. Aqui, o êmbolo é composto por um ímã permanente, dotado de movimento descendente e ascendente provido por um solenóide. Na posição superior do êmbolo (válvula aberta), este aproxima-se do material ferromagnético, gerando uma força magnética que o mantém atracado nesta posição. O mesmo se passa na posição inferior, mantendo a válvula fechada.

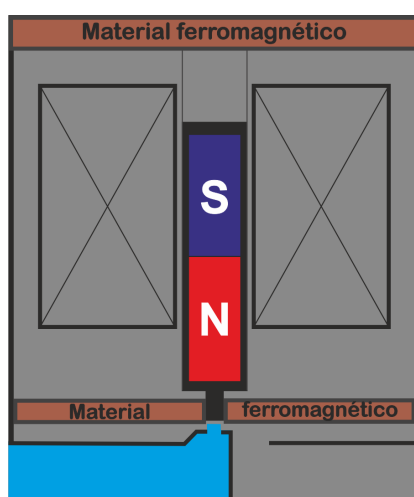


Figura 3.5: Sistema proposto 2

Um terceiro sistema de atuação eletromagnética biestável é apresentado nas Figuras

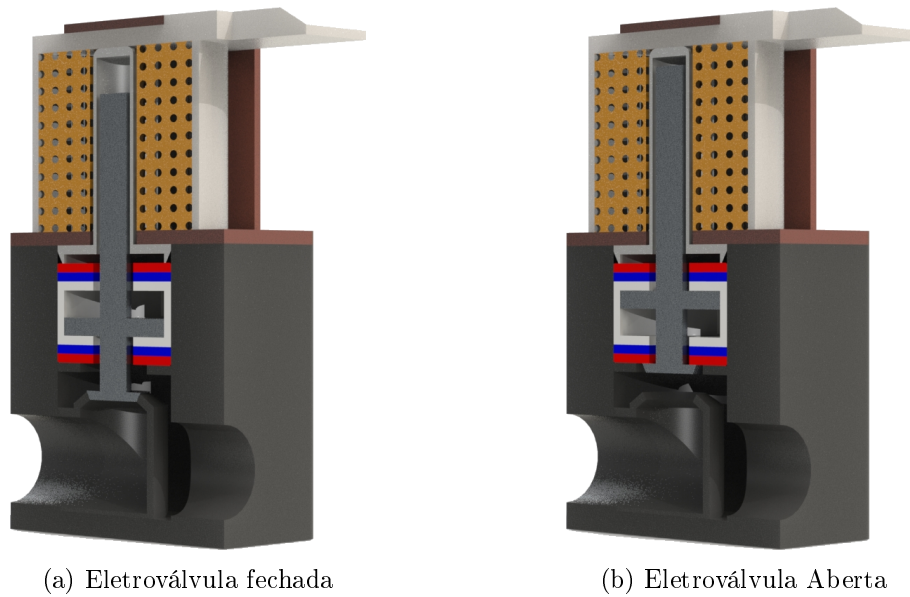


Figura 3.6: Sistema proposto 3

3.6a e 3.6b. Recorre-se às ferramentas CAD, de forma a ilustrar melhor a estrutura da eletroválvula, não só do sistema proposto 3, como também dos sistemas anteriores visto que apresentam semelhanças a nível estrutural.

Como ilustra a Figura 3.6, a válvula é composta por um êmbolo ferromagnético, dois ímanes permanentes e um solenóide. O disco ferromagnético acoplado mecanicamente ao êmbolo é atraído pelo íman permanente inferior, e enquanto o êmbolo não for comutado pelo solenóide o orifício permanece fechado. Seguindo o mesmo raciocínio que nos exemplos anteriores, o solenóide exerce uma força sobre o êmbolo que vence a força magnética proveniente do íman permanente e faz com que este suba. A partir de um certo deslocamento, o disco ferromagnético é atraído pelo íman permanente superior, atingindo a segunda posição estável (válvula aberta).

3.2.2 Atuação piezoelétrica

Quando é aplicada uma pressão em cristais não condutores ou materiais cerâmicos, gera-se uma tensão elétrica. Este fenómeno é conhecido como efeito piezoelétrico e é utilizado, por exemplo, em sensores de pressão. O efeito inverso também existe: quando é aplicada uma diferença de potencial num material com características piezoelétricas, resulta na sua deformação mecânica. Este expande numa direção e contrai noutra.

Os materiais piezoelétricos apresentam uma resposta rápida a variações da tensão aplicada, com grande repetibilidade. Podem ser usados em aplicações onde sejam necessários movimentos precisos com oscilação repetível, como é o presente caso.

Contudo, o deslocamento é muito pequeno. De forma a amplificar o curso e facilitar a utilização de tensões baixas são utilizados quatro tipos de amplificações disponíveis: pilha constituída por vários cristais piezoelétricos para uma atuação linear - Figura 3.7; a junção de duas ou mais tiras encastradas de material com características piezoelétricas - Figura 3.8; câmaras de amplificação hidráulica através de fluido incompressível - Figura 2.15; ou amplificação mecânica, o que acrescenta complexidade e custo.

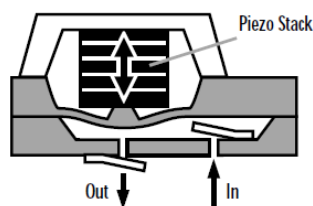


Figura 3.7: Amplificação baseada numa pilha de cristais piezoelétricos - [47]

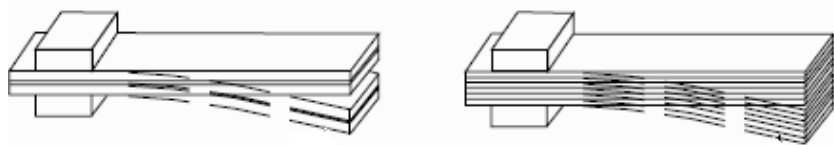


Figura 3.8: Amplificação baseada em tiras de material piezo encastradas - [48]

Pode ser considerada uma atuação flexível, visto que o deslocamento proporcionado pode ser regulado pela tensão aplicada ao material piezoelétrico. É pouco sensível a gradientes de temperatura, apresenta um consumo energético relativamente baixo enquanto permanece atuado e é uma das mais rápidas opções de comutação.

Outra vantagem inerente a esta atuação é a força exercida quando atuado, na ordem dos kN , o que pode ser interessante em questões de fecho/isolamento da válvula e inconveniente em termos de desgaste mecânico.

Os materiais piezoelétricos operam com forças e velocidades elevadas e retornam à posição neutra quando deixam de ser energizados.

Em geral, a atuação piezoelétrica apresenta uma grande desvantagem: o elevado custo, especialmente quando se recorre ao sistema de amplificação linear (pilha).

Sistemas propostos

Após uma pesquisa acerca de sistemas piezoelétricos à disposição no mercado, foram elaboradas propostas com os sistemas pertinentes para o caso em questão. São referidas especificações técnicas de determinados fabricantes, sendo de notar que estes valores servem apenas como referência para o estudo.

Os atuadores piezoelétricos Noliacm podem alcançar o desempenho total com uma tensão de operação muito baixa. A Tabela 3.6, contém as especificações do atuador piezoelétrico ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9: Atuador de anel NAC2121 - [49]

Tabela 3.6: Anel piezo - [49]

Especificações		
Atributos	Valor	Tolerância
Diâmetro exterior	6 mm	+/- 0,2 mm
Diâmetro interior	2 mm	+/- 0,1 mm
Espessura	2 mm	+/- 0,05 mm
Tensão de operação máx.	200 V	
Deslocamento máx.	3,3 μm	+/- 15%
Força	1060 N	+/- 20%
Temperatura de operação máx.	200 °C	
Material	NCE51F	

Recorrendo ao princípio de amplificação hidráulica, visto que se trata de um fluido incompressível no interior da câmara de amplificação hidráulica, há conservação do volume, Equação 3.17.

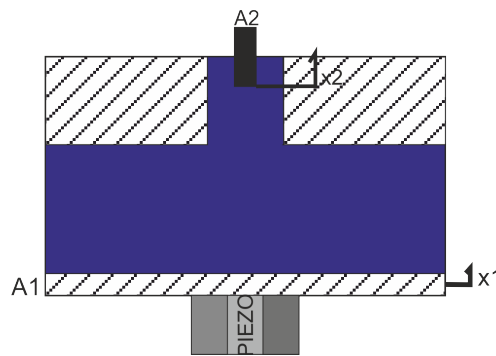


Figura 3.10: Esquema de amplificação hidráulica

$$V_1 = V_2 \Leftrightarrow A_1 x_1 = A_2 x_2 \quad (3.17)$$

sendo A_1 e A_2 as áreas da superfície em contacto com o fluido, e x_1 e x_2 os seus respetivos deslocamentos.

Para o raio do êmbolo superior de 1 mm (retângulo preto na Figura 3.10), sabendo que x_2 adota os valores de deslocamento expostos na Tabela 3.5, e o deslocamento máximo do anel piezoelétrico, x_1 , é dado pela Tabela 3.6, torna-se possível determinar o diâmetro da câmara de amplificação.

Tabela 3.7: Diâmetro da câmara de amplificação

A_2 [mm ²]	$x_2 = \delta x$ [mm]	x_1 [mm]	A_1 [mm ²]	ϕ_{camara} [mm]
	$268 \cdot 10^{-3}$		255	18
$\pi \cdot r^2 = 3,14$	$134 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	127,5	12,7
	$90 \cdot 10^{-3}$		85	10,4

De acordo com a informação exposta anteriormente, Tabela 3.7, é apresentada uma proposta de atuação piezoelétrica com amplificação hidráulica, Figura 3.11. Com a expansão do anel piezoelétrico, o êmbolo fecha o orifício de passagem de gás. No instante em que o anel é desenergizado, a mola tem como função a abertura da válvula.

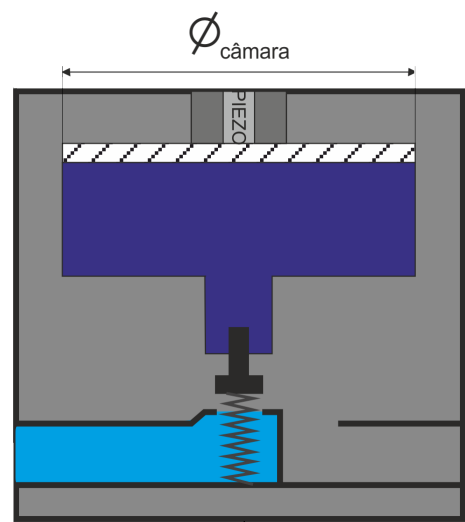


Figura 3.11: Sistema piezoelétrico proposto 1

O FlexFrame PiezoActuator da DSM é um atuador piezoelétrico que consiste numa flexão guiada, e está na base de atuação do sistema piezoelétrico proposto seguinte.



Figura 3.12: FlexFrame PiezoActuator - [50]

O atuador apresentado na Figura 3.12, é caracterizado pelas especificações apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Piezo Atuador - [50]

Especificações		
Atributos	Valor	Tolerância +/-
Tensão de operação máx.	-30 a +150 V	
Deslocamento máx.	300 μm	+/- 10%
Força	147 N	+/- 10%
Massa	35 g	+/- 5%
Material	17-4 PH Stainless Steel	

A Figura 3.13 representa um corte transversal da presente proposta. A válvula é composta por três componentes principais: o corpo da válvula, o mecanismo de atuação que inclui uma pilha de cristais piezoelétricos, a estrutura de amplificação mecânica e a membrana.

Trata-se de piezos, que ao contraírem na direção longitudinal, as paredes da estrutura de amplificação defletem, provocando o deslocamento pretendido. Com este deslocamento a membrana da válvula sofre uma deflexão até encostar no orifício de entrada de gás, fechando a eletroválvula, [51].

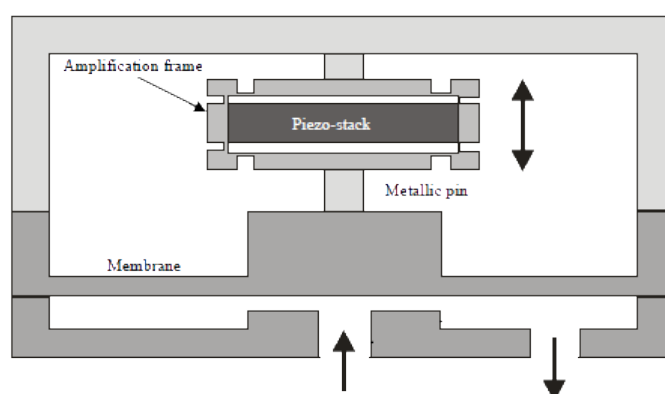


Figura 3.13: Sistema piezoelétrico proposto 2 - [51]

3.2.3 Conclusão

Devido ao mencionado no decorrer da apresentação das propostas, como o elevado custo dos materiais piezoelétricos, o aumento da complexidade devido ao acrescento de amplificadores do deslocamento de atuação e a elevada precisão necessária à construção das propostas apresentadas, conclui-se que a atuação eletromagnética, na globalidade, é mais vantajosa para a finalidade pretendida, e por isso, a atuação piezoelétrica será desconsiderada no que se segue.

Capítulo 4

Modelação dos sistemas propostos

Um sistema pode ser visto como um objeto ou uma coleção de objetos cujas propriedades são o objetivo do estudo. Este estudo pode ser feito através de análises experimentais ou recorrendo à construção de um modelo do sistema e realizar as simulações necessárias.

Análises experimentais requerem protótipos, que muitas vezes podem ter um elevado custo ou até mesmo, numa fase inicial, podem ainda nem possuir as características a ser analisadas, visto que alguns sistemas devem ser desenvolvidos sob condições específicas. Dadas as dificuldades inerentes a análises experimentais, a modelação de sistemas é em muitas ocasiões escolhida, e por vezes a única possibilidade, quando se trata da área de desenvolvimento, como é o caso. Com um modelo válido é possível analisar a dinâmica do sistema em questão. Desta forma, todos os parâmetros que afetam os resultados esperados podem ser variados no modelo, até atingir o desempenho desejado, sem necessidade de prototipar todas as possibilidades para serem testadas.

Resumidamente, um modelo, é uma ferramenta utilizada para responder a perguntas em relação ao sistema sem ter que recorrer à construção e a ensaios experimentais. Os modelos matemáticos presentes neste documento consistem numa coleção de relações matemáticas, que podem ser usadas para descrever o comportamento do sistema através das simulações.

Este capítulo descreve a construção dos modelos referentes às propostas abordadas na secção anterior, de modo a avaliar a viabilidade dos conceitos, até atingir o modelo válido e representativo da eletroválvula desenvolvida no presente trabalho.

4.1 Sistema proposto I

O conceito proposto, ilustrado na Figura 3.4, é composto por um solenóide com um êmbolo ferromagnético, dois ímanes permanentes e uma mola, cuja descrição da dinâmica já foi abordada anteriormente.

A Figura 4.1 mostra um esquema de uma válvula de solenóide em que o êmbolo ferromagnético é rodeado pelo enrolamento do solenóide, com um tubo guia de material paramagnético que proporciona o guiamento do movimento do êmbolo.

O êmbolo ferromagnético é provido de movimento linear no interior do tubo guia quando a corrente começa a fluir através da bobina do solenóide. Assim que a bobina é energizada gera-se um fluxo magnético dependente da força magnetomotriz e da relutância do circuito magnético.

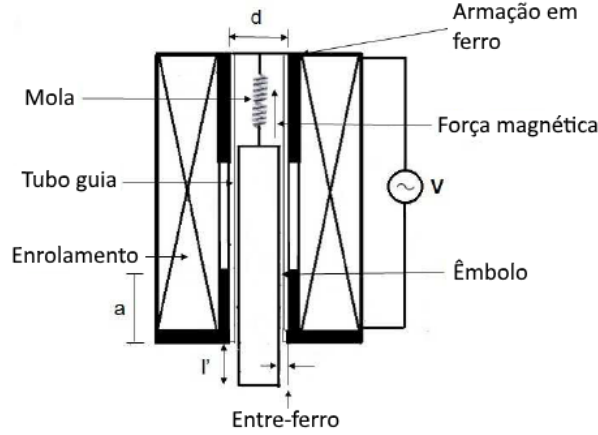


Figura 4.1: Válvula solenóide - [52]

Seguem-se os pressupostos considerados para o modelo:

- A força da mola é linearmente proporcional ao deslocamento do êmbolo e à sua constante.
- A força de atrito é linearmente proporcional à velocidade do êmbolo e ao coeficiente de atrito dinâmico.
- O cálculo da relutância tem apenas em consideração o *air gap*.
- Os efeitos das perdas de fluxo magnético e da relutância do ferro são desprezados.

Aplicando as Leis de Kirchhoff, com base na Figura 4.1,

$$V = RI + \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.1)$$

onde o fluxo articulado λ é uma variável dependente da corrente do enrolamento I , e da distância do *air gap* x (deslocamento do êmbolo) [52].

$$V = RI + L(x) \cdot \frac{dI}{dt} + I \cdot \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (4.2)$$

A Equação 4.2 é composta por três termos. O primeiro termo é referente à queda de tensão devido à resistência do fio do enrolamento do solenóide, o segundo termo deve-se à tensão devida à variação de corrente na bobina e, por fim, o último termo representa a força eletromotriz devida ao movimento do êmbolo [52].

A força magnética pode ser calculada através da co-energia, W'_{fld} ,

$$F_{mag} = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial x} \quad (4.3)$$

Por sua vez, a co-energia pode ser estimada pela Equação 4.4 como

$$W'_{fld}(i, x) = \int_0^I \lambda(i, x) di = \frac{1}{2} L(x) I^2 \quad (4.4)$$

A relutância total resulta do somatório da relutância devido ao *air gap* superior e inferior. A indutância do enrolamento varia com a variação da relutância total, como caracterizado na equação

$$L = \frac{N^2}{R'} = \frac{\pi d \mu_0 a N^2}{g} \cdot \left(\frac{x}{x+a} \right) = L' \cdot \left(\frac{x}{x+a} \right) \quad (4.5)$$

sendo L' uma constante [52]. A partir das Equações 4.2, 4.3 e 4.5 a força magnética pode ser calculada como

$$F_{mag} = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{aL'}{(a+x)^2} \quad (4.6)$$

Por fim, a Equação dinâmica que descreve o movimento do êmbolo é dada por

$$F_{mag} = M\ddot{x} + kx + Mg_r + b\dot{x} \quad (4.7)$$

É de notar que os sistemas propostos nas Figuras 3.4, e 3.6, apresentados na secção [3.2.1], pressupõe a inversão do sentido da força magnética F_{mag} com a inversão do sentido da corrente que percorre o enrolamento do solenóide, como já foi abordado.

Após algumas simulações do modelo matemático descrito observou-se que com a inversão do sentido de corrente que percorre o solenóide não se obtém uma força magnética em sentido contrário. Tal pode ser matematicamente explicado através da Equação 4.6, visto que o termo referente à intensidade de corrente é elevado ao quadrado.

Conclui-se que invertendo o sentido de corrente através das espiras inverte-se o sentido do fluxo magnético mas não se verifica a mudança do sentido da força do solenóide, visto que o êmbolo ferromagnético inverte a sua polaridade com o sentido do fluxo magnético, resultando sempre numa força com o mesmo sentido. Posto isto, os sistemas propostos 1 e 3 da secção [3.2.1], não serão considerados pois não representam uma solução funcional.

4.2 Sistema proposto II

Torna-se clara a necessidade de utilizar um solenóide com êmbolo de íman permanente, de modo a tornar possível a inversão da força magnética com a inversão do sentido da corrente. Um íman possui os dipolos norte e sul bem definidos, ao contrário de um material ferromagnético, em que os dipolos desemparelhados se alinham facilmente com o campo magnético imposto, [53].

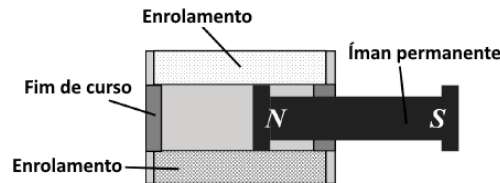


Figura 4.2: Corte transversal de um solenóide com êmbolo de íman permanente - [54]

A Figura 4.2 ilustra o solenóide proposto. Neste sistema prevalecem duas forças, uma é a força eletromagnética proveniente do campo magnético quando a corrente atravessa o enrolamento, outra é a força magnética causada pelo êmbolo (íman permanente).

A força resultante do solenóide depende do seu comprimento, *air gap*, número de espiras do enrolamento, corrente aplicada e do tipo de íman permanente utilizado. É deduzida a equação da força eletromagnética em função destas variáveis, de modo a obter uma aproximação válida [54].

O campo magnético ao longo do eixo de uma espira circular de raio r , percorrida por uma corrente I , Figura 4.3, pode ser expresso pela Lei de Biot-Savart,

$$B_{sol} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \times r'}{|r'|^3} \quad (4.8)$$

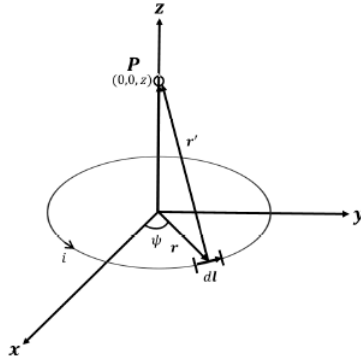


Figura 4.3: Espira circular percorrida por uma corrente I - [54]

onde dl e r' são respetivamente, o segmento de linha e a distância entre o ponto em análise e o ponto onde o campo magnético é mais forte. Sabe-se que $dl = r \cdot d\psi \hat{\Psi}$, $r' = z\hat{z} - r\hat{r}$ e $|r'| = \sqrt{z^2 + r^2}$. Assim, o campo magnético em qualquer ponto P arbitrário ao longo do eixo, é dado por,

$$B_{sol} = \frac{\mu_0 I r^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\Psi}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \hat{z} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I r^2}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \hat{z} \quad (4.9)$$

A Figura 4.4 ilustra um corte transversal do solenóide proposto. O campo eletromagnético axial do solenóide é dado pela Equação 4.9. Recorrendo às características geométricas do solenóide, tais como o diâmetro interno d , o diâmetro externo D , o número de espiras N e o comprimento L é possível desenvolver a Equação 4.10 a partir da Equação 4.9 [54].

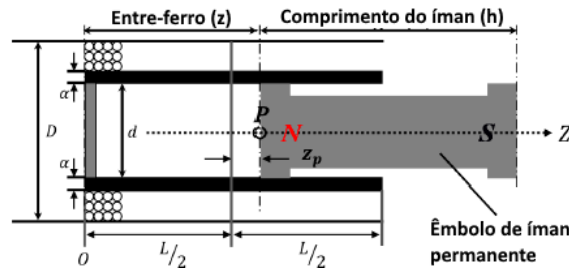


Figura 4.4: Características geométricas do solenóide com íman permanente - [54]

$$B_{sol} = \int_0^L \int_{d/2}^{D/2} \frac{\mu_0 n I r^2}{2[r^2 + (z_p + L/2 - z)^2]^{3/2}} \hat{z} dr \quad dz \quad (4.10)$$

onde, $n = N/L$, e $z = L/2 + z_p$ é o comprimento do *air gap*. Pela integração da Equação 4.10, o campo magnético em qualquer ponto P é dado por

$$B_{sol} = \frac{\mu_0 N I}{2L(D-d)} \cdot (L + 2z_p) \cdot \ln \left[\frac{D + \sqrt{D^2 + (L + 2z_p)^2}}{d + \sqrt{d^2 + (L + 2z_p)^2}} \right] \dots$$

$$\dots + \frac{\mu_0 N I}{2L(D-d)} \cdot (L - 2z_p) \cdot \ln \left[\frac{D + \sqrt{D^2 + (L - 2z_p)^2}}{d + \sqrt{d^2 + (L - 2z_p)^2}} \right] \quad (4.11)$$

A força eletromagnética $F_s(z, i)$, proveniente do solenóide, que atua no êmbolo pode ser expressa pela Equação 4.12.

$$F_s(z, i) = \int \rho_m B_{sol} dV + \int \sigma_m B_{sol} ds \quad (4.12)$$

onde, B_{sol} é o campo magnético externo produzido pelo enrolamento, a sua direção é igual à do fluxo magnético e a sua intensidade é calculada pela Equação 4.11.

A partir desta Equação 4.12, é possível determinar a força aplicada ao íman permanente através do seguinte procedimento, [55]:

1. Assumindo que o íman permanente possui uma magnetização uniforme, na direção do eixo longitudinal do solenóide

$$\sigma_m = M_{mag} = \frac{B_r}{\mu_0} \quad (4.13)$$

2. Considerando um íman permanente de raio R e comprimento h , a densidade de carga equivalente é

$$\rho_m = -\nabla \cdot M_{mag} = 0 \quad (4.14)$$

substituindo as Equações 4.13 e 4.14 na Equação 4.12 obtém-se

$$F_s(z, i) = \int \sigma_m B_{sol} ds = \frac{B_r}{\mu_0} B_{sol} \int_0^{2\pi} \int_0^{d/2+\alpha} r dr d\psi = \frac{B_r B_{sol} A}{\mu_0} \hat{z} \quad (4.15)$$

sendo $A = \pi(d/2 + \alpha)^2$ a área referente ao diâmetro interno do solenóide [54].

Através da Equação 4.15 conclui-se que a força eletromagnética é proporcional ao campo magnético do solenóide e ao magnetismo residual do íman permanente.

Nesta análise verifica-se a inversão do sentido da força do solenóide com a inversão do sentido da corrente que atravessa o seu enrolamento. O circuito magnético é considerado como ideal, onde são ignoradas relutâncias magnéticas e perdas de fluxo, sendo uma aproximação grosseira do desejado.

4.3 Sistema proposto III

O circuito magnético de um solenóide é um canal de linhas de fluxo do campo magnético através de um meio metálico (ferro) e ar. O perfil das linhas de fluxo radial gerado é toroidal. Estas, envolvem a superfície externa do solenóide e concentram-se no eixo axial deste, onde se dá o movimento do êmbolo.

A eficiência magnética do solenóide é determinada pelo comprimento do circuito magnético e as relutâncias magnéticas associadas. Um fator com uma influência considerável na eficiência magnética do sistema é a armação exterior do enrolamento, que é dividida em dois tipos distintos, armação fechada e armação aberta. A armação fechada é conhecida como armação tubular, Figura 4.5c, e a armação aberta inclui dois tipos, armação em C, Figura 4.5a e armação em D, Figura 4.5b.

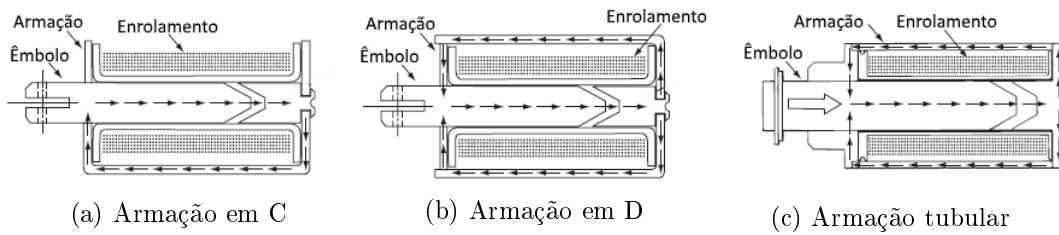


Figura 4.5: Diferentes tipos de armação - Retirada de [56]

O circuito magnético característico de cada tipo de armação, também ilustrado na Figura 4.5, explica a sua influência na eficiência magnética. Dado que o caminho das linhas de fluxo magnético em torno do enrolamento de uma armação tubular é quase na totalidade através do alojamento metálico, torna os solenóides com armação tubular mais eficientes em relação aos solenóides com armação em C e D, visto que parte das linhas de fluxo nestes últimos dois tipos de armação passam através do ar. Pode facilmente ser explicado pela permeabilidade do meio que as linhas de fluxo atravessam, materiais como o ferro possuem uma permeabilidade elevada, em relação à permeabilidade do vazio, o que reduz largamente a relutância do circuito magnético.

A armação em D circunda o enrolamento pelos dois lados, sendo o circuito magnético parcialmente fechado, mas a armação tubular continua a ser mais eficiente porque o alojamento de geometria cilíndrica proporciona um caminho para o fluxo magnético de 360°.

4.3.1 Descrição do sistema implementado

Assim em face ao que foi visto anteriormente, a Figura 4.6 resulta de um desenvolvimento, com ponto de partida na Figura 3.5.

Quando o solenóide não se encontra energizado, o êmbolo (assumindo que o polo norte se encontra mais próximo do núcleo ferromagnético) gera uma força de atração com o material ferromagnético no interior do solenóide devido ao campo magnético do íman permanente. Quando o enrolamento é percorrido por uma corrente com um sentido tal que o campo magnético devido ao enrolamento saia pelo núcleo ferromagnético, gera neste um polo norte, vista A da Figura 4.6. Dado que polos iguais se repelem, gera-se uma força repulsiva entre o núcleo e o íman permanente (êmbolo) que, resulta num movimento do êmbolo. Quando o polo sul do íman permanente se aproximar o suficiente

do material ferromagnético à sua direita, gera-se uma força de atracção, atingindo assim a segunda posição estável. A partir deste instante é possível cessar a alimentação do solenóide e manter o êmbolo na posição avançada.

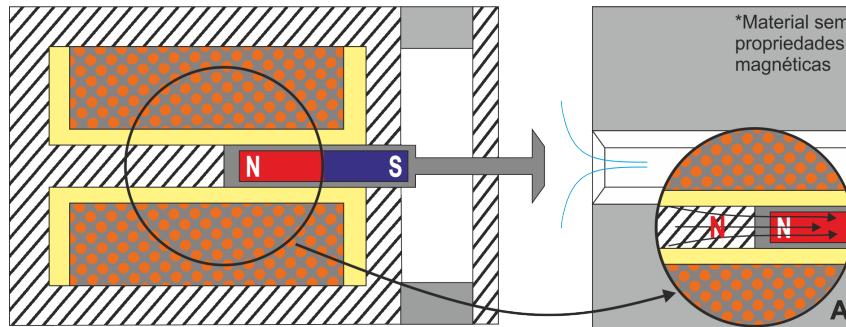


Figura 4.6: Ilustração do modelo com armação tubular e íman permanente

É de notar que entre o íman permanente e o material ferromagnético é necessário a presença de um material não metálico (nylon ou teflon), de forma a impor uma distância mínima entre eles. Dado que a inexistência de espaçamento entre eles gera uma força de atracção considerável, sendo possível que a força do solenóide não a consiga vencer.

No momento em que o sentido da corrente é alterado, o fluxo magnético ocorre em sentido contrário e o núcleo ferromagnético transforma-se num polo sul, originando uma força que faz com que o êmbolo recue para a posição inicial. Portanto, alterando o sentido da corrente que atravessa o enrolamento o êmbolo de íman permanente é dotado de um movimento bi-direcional.

O modelo matemático da eletroválvula desenvolvida neste documento é composto por vários sub-modelos, sendo eles: modelo eléctrico, modelo magnético, modelo mecânico e modelo fluídico, todos eles analisados em detalhe separadamente. O ponto de partida é o *driver* de potência da eletroválvula, como será estudado na Secção [6.3], e o objetivo a alcançar é o caudal mássico de gás proporcionado pela eletroválvula.

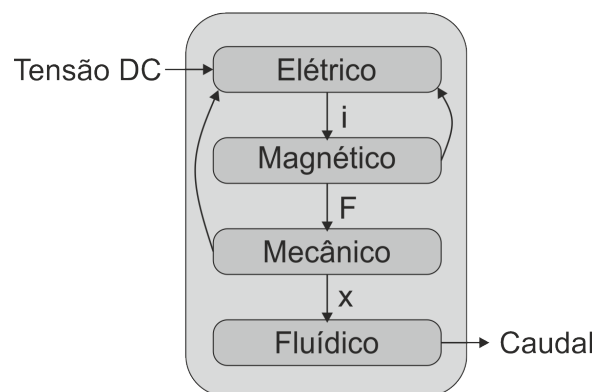


Figura 4.7: Sub-modelos da eletroválvula

4.3.2 Modelo Elétrico

Como mencionado anteriormente, o sistema proposto inclui o modelo do solenóide. Desprezando o efeito da histerese do mesmo, o circuito equivalente é composto pela resistência do enrolamento R , tensão induzida $V(\phi)$ e indutância não linear $L(\phi)$ devido ao enrolamento e ao material, Figura 4.8.

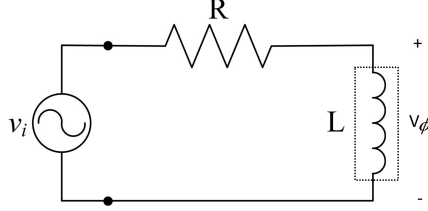


Figura 4.8: Circuito equivalente do solenóide

Dado o circuito equivalente anterior, a equação de tensão do solenóide, é dada por:

$$V = IR + V(\phi) \quad (4.16)$$

Recorrendo à Lei de Faraday,

$$V(\phi) = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.17)$$

onde λ é o fluxo magnético articulado do solenóide, variável dependente da corrente I que atravessa o enrolamento e do *air gap* entre o êmbolo e o núcleo ferromagnético. Para um determinado número de espiras N do enrolamento, o solenóide gera um fluxo magnético $\phi(i, x)$ através do espaçamento em vazio referido; assim, o fluxo articulado pode ser expresso por:

$$\lambda = N\phi(i, x) \quad (4.18)$$

e pela Equação 4.17, vem:

$$V(\phi) = \frac{d[N\phi(i, x)]}{dt} = N \frac{\partial \phi(i, x)}{\partial i} \frac{di}{dt} + N \frac{\partial \phi(i, x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.19)$$

Portanto, a Equação 4.16, pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} V &= IR + N \frac{\partial \phi(i, x)}{\partial i} \frac{di}{dt} + N \frac{\partial \phi(i, x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \\ &= IR + L_{sol}(i, x) \frac{di}{dt} + N \frac{\partial \phi(i, x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad (4.20)$$

A Equação 4.20 é composta por três termos: o primeiro é referente à queda de tensão devido à resistência do enrolamento, o segundo é a tensão induzida devido a variações de corrente, e o ultimo representa a força eletromotriz devido ao movimento do êmbolo.

4.3.3 Modelo Magnético

De modo a determinar $L_{sol}(i, x)$ e $\phi(i, x)$ presentes na Equação 4.20 deve-se analisar o campo magnético total presente no solenóide. Devido aos seus dipolos, o íman permanente possui um campo magnético sempre presente, e o segundo campo magnético surge quando o enrolamento é energizado. Ambas as fontes de campo magnético presentes no atuador podem ser analisadas separadamente. Assim, o campo magnético total e o fluxo magnético total podem ser expressos por:

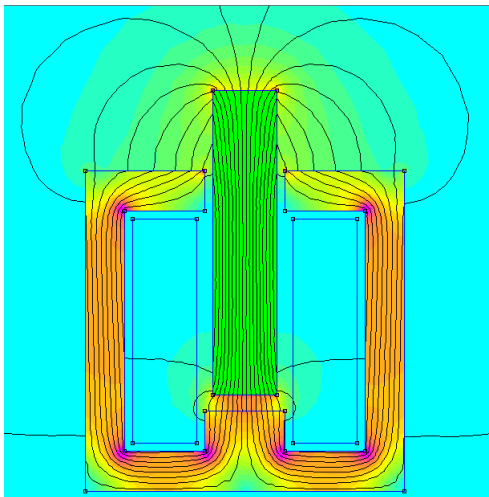
$$B(i, x) = B_{sol}(i, x) + B_{iman}(i, x) \quad (4.21)$$

$$\phi(i, x) = \phi_{sol}(i, x) + \phi_{iman}(i, x) \quad (4.22)$$

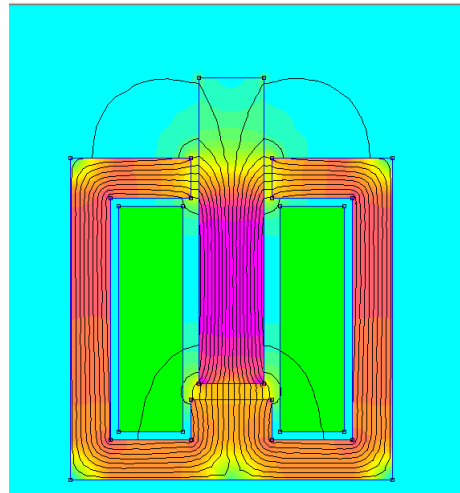
A Figura 4.5c ilustra o trajeto do fluxo magnético num solenóide tubular com um êmbolo ferromagnético. O objetivo da análise seguinte é determinar os trajetos dos fluxos devidos ao íman permanente e ao solenóide em análises distintas. Para isso recorreu-se ao software FEMM(Finite Element Method Magnetics).

Primeiramente foi elaborado um *sketch* do corte transversal do atuador, e em seguida foram dadas as características do meio envolvente (ar), materiais (armação em ferro e o êmbolo de íman permanente) e características do solenóide, como número de espiras e diâmetro do fio de cobre. É de notar que a presente análise não teve em conta as dimensões do solenóide mas sim a proporcionalidade de distâncias, visto que serve apenas para concluir qual o caminho do fluxo magnético.

Numa primeira análise foi atribuído um valor nulo de corrente ao solenóide, para analisar unicamente o fluxo devido ao íman permanente, como se pode ver pela Figura 4.9a. Em seguida, a propriedade do material do êmbolo foi alterada, passou a ser um material ferromagnético, e foi aplicada uma corrente de 1 [A] aos terminais do enrolamento do solenóide para estudar apenas o campo magnético gerado pelo solenóide, Figura 4.9b.



(a) Fonte: íman permanente



(b) Fonte: enrolamento do solenóide

Figura 4.9: Caminho do fluxo magnético

Fluxo devido ao íman permanente

Quando não existe corrente no enrolamento, a única fonte magnética é o íman permanente, como ilustrado na Figura 4.9a. A Figura 4.10 representa o circuito magnético equivalente correspondente, onde R_x é a relutância magnética entre o núcleo ferromagnético e o êmbolo, R_a é a relutância magnética entre o topo do êmbolo e armação do solenóide, R_{iman} é a relutância magnética no íman permanente e, por fim, F_m é a força magneto-motriz do íman permanente. Note-se que a relutância do material ferromagnético da armação do solenóide foi desprezada, dado que a permeabilidade do ferro é bastante superior à permeabilidade do vazio.

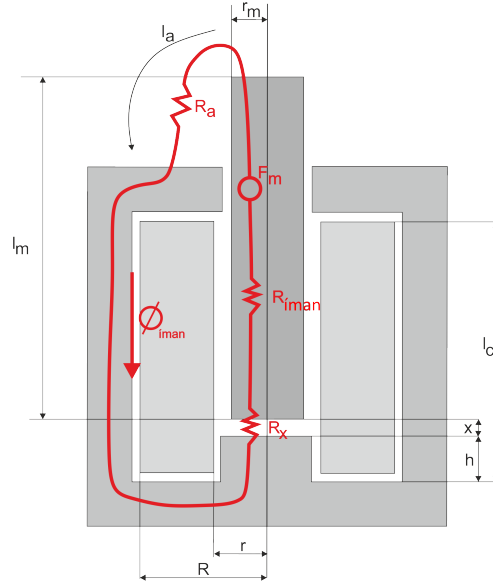


Figura 4.10: Circuito equivalente - íman permanente

A partir do circuito equivalente pode-se considerar:

$$F_m = \phi_{iman}(i, x) \cdot (R_{iman} + R_x + R_a) \quad (4.23)$$

sabe-se que para um íman permanente de geometria cilíndrica com um comprimento l_m e uma direção de magnetização axial constante ao longo do seu eixo, [55]:

$$F_m = H_c l_m \quad (4.24)$$

$$M_{mag} = \frac{B_r}{\mu_0} \quad (4.25)$$

$$H_c = M_{mag} \quad (4.26)$$

Assim, a força magneto-motriz do íman permanente é dada por

$$F_m = \frac{B_r}{\mu_0} l_m \quad (4.27)$$

A partir da Equação 4.23 determina-se o valor do fluxo magnético gerado pelo íman permanente.

$$\phi_{iman}(i, x) = \frac{F_m}{R_{iman}R_xR_a} \quad (4.28)$$

sendo as relutâncias R_x , R_{iman} e R_a , dadas por:

$$R_x = \frac{x}{\mu_0 A} \quad (4.29)$$

$$R_{iman} = \frac{l_m}{\mu_m A} \quad (4.30)$$

$$R_a = \frac{l_a}{\mu_0 A} \quad (4.31)$$

μ_m é a permeabilidade magnética do íman permanente, e admite-se que $\mu_m = \mu_0$ sabendo que $\mu_m = 1,05\mu_0$. De forma a determinar o fluxo magnético do íman permanente é necessário recorrer a uma aproximação do valor do *air gap* entre o topo do êmbolo e a armação do solenóide, que pode ser dado pelo perímetro de uma semicircunferência com raio x (deslocamento do êmbolo), $l_a = 3.14 \cdot x$.

Assim, pelas Equações 4.27, 4.29, 4.30 e 4.31, a Equação 4.28 pode ser reescrita como

$$\phi_{iman}(i, x) = \frac{B_r l_m A}{l_m + 4.14x} \quad (4.32)$$

A equação anterior mostra que o fluxo devido ao íman permanente depende do material magnético, das dimensões do íman permanente e do espaçamento em vazio. À medida que x aumenta, aumenta a relutância magnética, diminuindo o fluxo magnético.

Fluxo devido ao enrolamento

O procedimento anterior também pode ser aplicado nesta secção; assim, a Figura 4.9b, dá origem à Figura 4.11, onde está presente apenas o campo magnético proveniente da energização do enrolamento. R_x é a relutância magnética entre o núcleo ferromagnético e o êmbolo, R_{iman} é a relutância magnética do íman permanente e R_g é a distância entre o êmbolo e a armação do solenóide. A relutância através da armação do solenóide pode ser desprezada pelas razões já apresentadas.

A Equação 4.33 representa a Força magneto-motriz resultante do circuito equivalente representado na Figura 4.11.

$$NI = \phi_{sol}(i, x) \cdot (R_x + R_g + R_{iman}) \quad (4.33)$$

em que R_x é dado pela Equação 4.29, R_{iman} e R_g são dados pelas seguintes expressões:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (4.34)$$

$$R_{iman} = \frac{l'_m - x}{\mu_0 A} \quad (4.35)$$

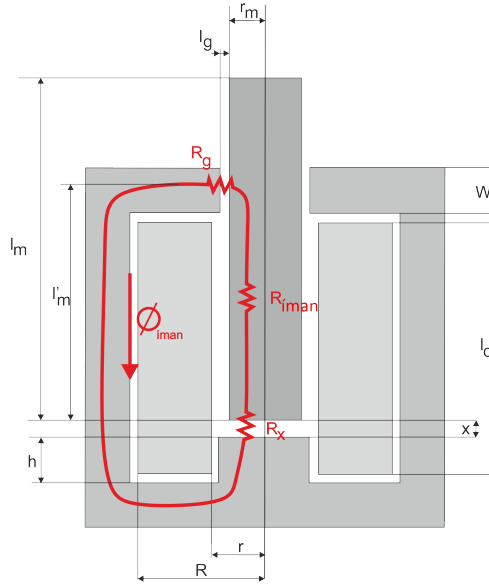


Figura 4.11: Circuito equivalente - enrolamento

sendo $l'_m = l_c - h + \frac{W}{2}$, a distância entre o núcleo ferromagnético do solenóide e o “caminho” do campo magnético.

Assim, pelas Equações 4.34, 4.35 e 4.33, o fluxo devido ao enrolamento do solenóide é dado por:

$$\phi_{sol}(i, x) = \frac{NI}{\frac{l'_m}{\mu_0 A} + \frac{l_g}{\mu_0 A_g}} \quad (4.36)$$

Indutância do enrolamento

A indutância de um enrolamento com N espiras, energizado por uma corrente I , é dada por:

$$L_{sol}(i, x) = N \frac{d\phi_{sol}(i, x)}{di} \quad (4.37)$$

Derivando a Equação 4.36, em ordem a I obtém-se

$$L_{sol}(i, x) = L_{sol} = \frac{N^2}{\frac{l'_m}{\mu_0 A} + \frac{l_g}{\mu_0 A_g}} \quad (4.38)$$

Conclui-se que, no modelo atual a indutância do enrolamento é caracterizada por uma constante, não depende da intensidade de corrente nem do deslocamento do êmbolo, devido a considerar a permeabilidade magnética do íman permanente igual à permeabilidade do vazio como aproximação.

Força do solenóide

A força total aplicada no êmbolo devido ao campo magnético produzido pelo enrolamento é dada pela Equação 4.12, onde dV e ds são, respetivamente, elemento de volume do íman permanente em contacto com o campo magnético do solenóide, B_{sol} , e área da face do íman permanente perpendicular ao campo magnético.

Assumem-se os pressupostos das Equações 4.13 e 4.14, visto que neste caso de estudo também se utiliza um íman permanente cilíndrico com uma magnetização M_{mag} uniforme ao longo do seu eixo.

Assim, a força que atua no êmbolo devido ao íman permanente pode ser determinada por:

$$\begin{aligned} F_{sol}(i, x) &= \int_A M_{mag} B_{sol}(i, x) dA \\ &= M_{mag} A [B_{sol}(i, x)|_{x1} - B_{sol}(i, x)|_{x2}] \end{aligned} \quad (4.39)$$

sendo $B_{sol}(i, x)|_{x1}$ e $B_{sol}(i, x)|_{x2}$ o valor do campo magnético do enrolamento em cada um dos dipolos do íman permanente.

Recorre-se a um solenóide com características geométricas, tais como diâmetro interno d , diâmetro externo D , número de espiras N e comprimento L , Figura 4.4. Com ponto de referência no centro do eixo longitudinal do solenóide a grandeza do campo magnético ao longo desse eixo com distância x do ponto de referência é dada pela Equação 4.11. A partir desta equação, a forma do campo magnético do solenóide ao longo do seu eixo longitudinal é ilustrada pela Figura 4.12.

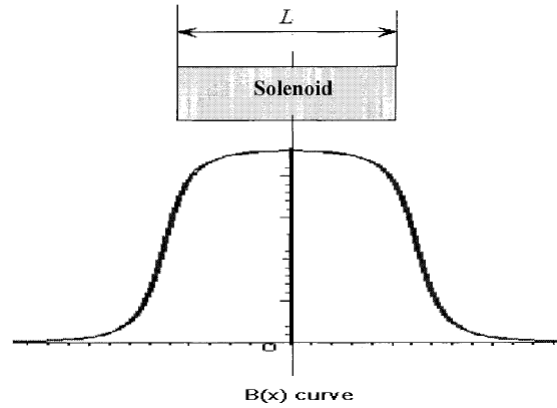


Figura 4.12: Grandeza do campo magnético no interior de um solenóide - [57]

Pela figura anterior é possível concluir que, próximo do ponto de referência, a grandeza do campo magnético admite aproximadamente um valor constante para pequenas distâncias (o deslocamento necessário para o objetivo do presente trabalho é relativamente pequeno quando comparado com o comprimento do solenóide). É de notar que, dado o valor do campo magnético, um dos polos do íman permanente deve ser colocado no seu centro. Posto isto, assume-se que o valor do campo magnético no segundo polo é aproximadamente zero, $B_{sol}(i, x)|_{x2} = 0$.

Assim, a Equação 4.39, pode ser reescrita,

$$\begin{aligned}
F_{sol}(i, x) &= M_{mag} A B_{sol}(i, x)|_{x1} \\
&= M_{mag} A B_{sol}(i, x) \\
&= M_{mag} \phi_{sol}(i, x)
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Força do íman permanente

Se o íman permanente se aproximar de um material ferromagnético os eletrões dentro dos átomos do material orientam os seus *spins* para coincidir com a força do campo magnético produzido pelo íman permanente. Assim, o material ferromagnético torna-se magnetizado, de forma a incorporar as linhas de fluxo magnético na sua forma, gerando uma força de atração.

A força de atração do íman permanente poderia ser determinada analiticamente. Por razões de simplificação, através do catálogo do fabricante de ímanes permanentes, K & J magnetics, Inc.[58] foram retiradas as curvas de força - distância características de um íman com determinadas dimensões geométricas e determinado material.

O íman permanente deve ser de AlNiCo, Grau N35, com dimensões reduzidas visto que o aumento das dimensões afeta largamente a força de atração, o que não é conveniente porque implicaria utilizar um solenóide de dimensões superiores de modo a vencer essa força. Posto isto, utilizou-se um íman com $\phi = 4[mm]$ e $L = 10[mm]$.

A Figura 4.13 ilustra o decaimento da força de atração com o deslocamento do íman referido.

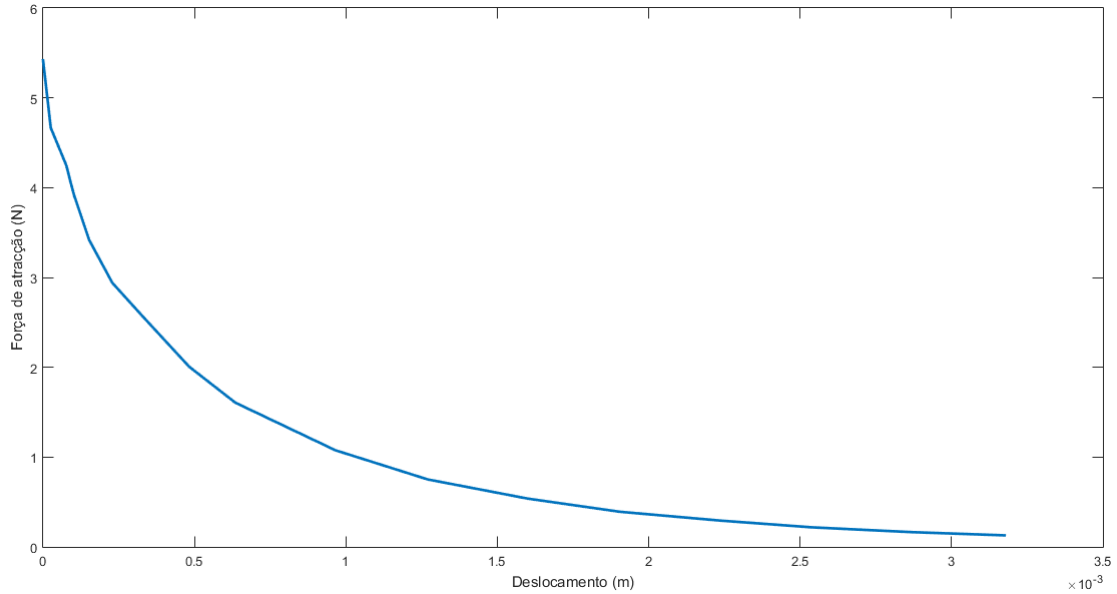


Figura 4.13: Curva força de atração - distância

Visto que a força de atração é elevada quando se trata de um deslocamento nulo, tornou-se clara a necessidade de utilizar uma cápsula para o íman permanente, de modo a introduzir uma distância entre o íman e o material ferromagnético quando o deslocamento é nulo, como será visto na figura seguinte.

4.3.4 Modelo Mecânico

Como foi abordado na secção anterior, a força magnética está presente na dinâmica do sistema. Contudo, outras forças têm influência no comportamento da eletroválvula.

O modelo ilustrado pela Figura 4.6, tem presente na sua essência a inércia do êmbolo $M\ddot{x}$, força de atrito F_a , as forças de atração do íman permanente F_{iman} e, como já foi referido, a força do solenóide $F_{sol}(i, x)$. A força de atração proveniente do íman permanente pode ser decomposta em duas forças com sentidos opostos, que dependem da distância a que cada um dos polos está do material ferromagnético, sendo F_{i_e} a força de atração entre o íman e o material ferromagnético à esquerda, e F_{i_d} a força de atração ao material ferromagnético à direita.

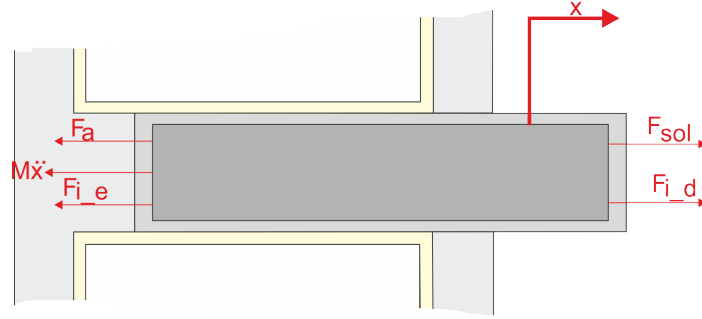


Figura 4.14: Diagrama de corpo livre

O diagrama de corpo livre anterior pode ser traduzido em:

$$M\ddot{x} + F_a + F_{i_e} = F_{sol}(i, x) + F_{i_d} \quad (4.41)$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{M} \left(F_{sol}(i, x) + F_{i_d} - F_{i_e} - F_a \right) \quad (4.42)$$

sendo M a massa total do corpo em movimento (êmbolo). Exceto a componente da força de atrito, que será abordada posteriormente, todas as outras componentes da Equação 4.42 já foram analisadas.

Força de atrito

A força de atrito age paralelamente à superfície de contacto e em sentido contrário à força aplicada sobre o êmbolo. Deve-se à existência de rugosidades na superfície de contacto da face exterior da cápsula do íman permanente com a superfície interior da bobina do solenóide. Essas rugosidades não são visíveis a nível macroscópico, mas são responsáveis por agir em sentido contrário à força que origina o movimento.

A força de atrito depende de dois fatores:

- Do tipo de materiais que estão em contacto: cada material possui determinadas características, e quanto melhor for a qualidade da superfície de contacto menor será a força de atrito. Esta propriedade é definida numericamente pelo coeficiente de atrito, que pode ser dinâmico ou estático, possuindo um valor diferente para cada material.
- Força normal: trata-se da reação normal à superfície sobre a qual o corpo está apoiado, e depende do peso do corpo. Quanto maior a força normal, maior será a força de atrito.

No conceito apresentado, consideraram-se dois tipos de força de atrito: Força de atrito estático, Equação 4.43, e força de atrito dinâmico, Equação 4.44.

$$F_{est} = \mu_{est} M g_r \quad (4.43)$$

$$F_{din} = b \dot{x} \quad (4.44)$$

Assim, a força de atrito total é dada por:

$$F_a = F_{est} + F_{din} \quad (4.45)$$

4.3.5 Máquina de estados

A utilização de um modelo para caracterizar a dinâmica do êmbolo da eletroválvula em qualquer situação, nomeadamente para simulação em tempo real onde todos os modos de operação podem ocorrer, implica que os limites para o seu movimento estejam perfeitamente definidos (neste caso $L_0 \leq x \leq L_{max}$), sendo L_0 o valor da espessura mínima imposta pela cápsula do êmbolo (ímã permanente) e L_{max} corresponde ao valor da espessura mínima da cápsula somado ao deslocamento pretendido. A modelação do comportamento do atuador quando o êmbolo atinge um dos extremos do cilindro é, por isso, fundamental para o uso do modelo em todas as situações [59].

A forma como o modelo deve ser implementado pode ser descrita através de um diagrama de estados, como ilustrado pela Figura 4.15. O diagrama possui três estados que correspondem às regiões possíveis de operação para o êmbolo: limite à direita, limite à esquerda, e regime de operação normal, onde se dá o movimento do êmbolo.

A principal ação para suportar os limites rígidos do atuador é a reinicialização da variável de estado, \dot{x} , quando o êmbolo atinge um dos limites ($x < L_0$ ou $x > L_{max}$). Quando ocorre este evento o atuador, “entra” num estado de paragem atribuindo-se o valor nulo à aceleração do êmbolo ($\ddot{x} = 0$) e inicializando-se a velocidade ($\dot{x} = 0$). Para “abandonar” este estado de paragem, a força aplicada resultante deve inverter o seu sinal [59].

O estado normal especifica que a aceleração do êmbolo, \ddot{x} , é definida usando a Segunda Lei de Newton, onde F_{res} é a força efetiva aplicada ao êmbolo e M é a massa total em movimento.

Veja-se o exemplo em que o êmbolo se encontra no estado normal com movimento em direção ao limite esquerdo; assim que se verificar a condição $T1$, o atuador transita de estado, a velocidade do êmbolo passa a zero, $\dot{x} = 0$ e se a força resultante ainda for inferior a zero o atuador mantém-se no sub-estado número 2, onde se encontra constantemente

a analisar a força resultante. Assim que esta inverte o sinal, transita para o sub-estado número 1, onde a aceleração já é determinada pela Segunda Lei de Newton, iniciando assim o movimento. O mesmo raciocínio se aplica quando o êmbolo atinge o estado Limite direito.

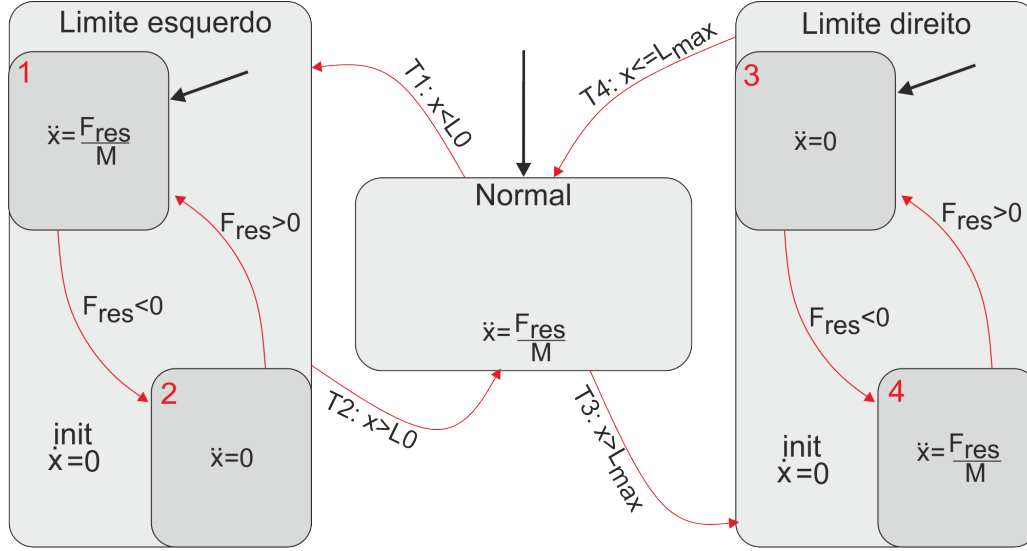


Figura 4.15: Diagrama de estados da eletroválvula

4.3.6 Modelo Fluídico

O modelo fluídico permite determinar o caudal mássico de gás que a eletroválvula proporciona, para obter a potência térmica desejada nos queimadores dos equipamentos de aquecimento de água domésticos.

A Equação 3.3 é responsável pela caracterização deste modelo. Todos os parâmetros da equação foram anteriormente determinados na Secção 3.1, exceto a área de passagem de fluído, Figura 4.16.

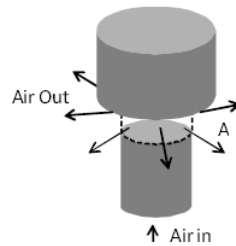


Figura 4.16: Área de passagem do fluido

Pela Equação 4.42 determina-se a aceleração do êmbolo, sendo possível determinar a posição (deslocamento) a partir da aceleração, e portanto:

$$\dot{x}(t) = \int \ddot{x}(t) dt \quad (4.46)$$

$$x(t) = \int \dot{x}(t) dt \quad (4.47)$$

Sabendo o diâmetro do orifício e o deslocamento do êmbolo $x = h$, a partir da Equação 3.15 é possível determinar a área de passagem de gás na eletroválvula.

4.4 Sumário

Nesta secção é realizado um agregado de todas as equações de estado presentes no modelo do solenóide com êmbolo de íman permanente dotado de movimento bi-direcional. Resolvendo as equações de estado é possível obter resultados da dinâmica do atuador.

A partir da Equação 4.20 é possível determinar a equação de estado que devolve a intensidade de corrente do sistema, I .

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{sol}(i, x)} \cdot \left[V - IR - N \frac{\partial \phi(i, x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right] \quad (4.48)$$

Sabe-se que, $L_{sol}(i, x)$ é dado pela Equação 4.38, da qual, l_g e A_g são parte integrante, Figura 4.17, e são determinados respetivamente pelas seguintes expressões:

$$l_g = r - R \quad (4.49)$$

$$A_g = 2\pi r W \quad (4.50)$$

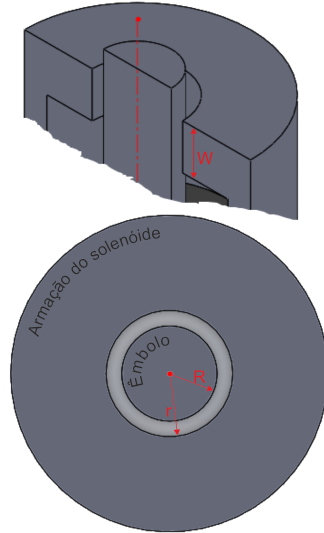


Figura 4.17: Ilustração - características geométricas

Observando as Equações 4.32 e 4.36, a Equação 4.22 pode ser reescrita como

$$\phi(i, x) = \phi_{iman}(x) + \phi_{sol}(I) \quad (4.51)$$

Então,

$$\frac{\partial \phi(i, x)}{\partial x} = \frac{\partial \phi_{iman}(x)}{\partial x} = \frac{-105AB_r l_m''}{(21x + 5l_m)^2} \quad (4.52)$$

Após determinadas todas as componentes das equações de estado, a dinâmica do êmbolo da eletroválvula em estudo é dada por:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{sol}} \cdot \left[V - IR - N \frac{\partial \phi_{iman}(x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right] \\ \ddot{x} = \frac{1}{M} \left(F_{sol}(i, x) + F_{i_d} - F_{i_e} - F_a \right) \\ \ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2} \end{cases} \quad (4.53)$$

O fluxo magnético e a indutância do enrolamento são dependentes do seu número de espiras, N . Por sua vez, esta grandeza é dependente da geometria do enrolamento e do diâmetro do fio a ser utilizado ϕ_{fio} , sendo assim oportuno determinar o número de espiras em função dos parâmetros anteriores.

É possível determinar o número de espiras através da relação das áreas transversais, da bobina e do fio de cobre, Figura 4.18.

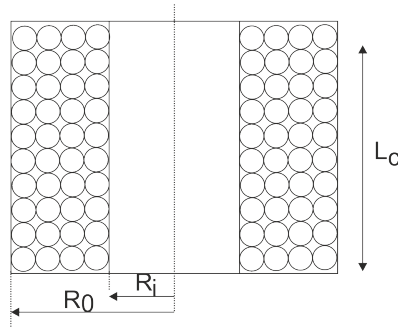


Figura 4.18: Ilustração de um corte transversal do enrolamento

$$A_{\square} = c \times l = (R_0 - R_i) \times L_c \quad (4.54)$$

$$A_{\odot} = \pi \times \phi_{fio}^2 \quad (4.55)$$

Portanto,

$$N = \frac{A_{\square}}{A_{\odot}} F \quad (4.56)$$

onde, $F = \frac{\pi}{4}$ é um fator que tem em conta os espaços em vazio entre as espiras de cobre.

Os mesmos parâmetros que influenciam o número de espiras do enrolamento também têm influência no comprimento do fio de cobre necessário e, por sua vez, a resistência do enrolamento está dependente deste comprimento.

$$R = \frac{4\rho(R_0^2 - R_i^2)L}{\phi_{fio}^4} \quad (4.57)$$

onde a resistividade do cobre é dado por, $\rho = 1.68 \times 10^{-8} [\Omega m]$.

4.4.1 Especificações do modelo

Após definido todo o modelo matemático que caracteriza o conceito em estudo, é oportuno especificar valores de algumas variáveis nesta secção. Algumas delas já foram referidas ao longo da apresentação do modelo matemático, outras são abordadas adiante no Capítulo 5.1, visto que estão sujeitas a um processo de otimização (maioritariamente dependentes dos aspetos dimensionais).

O valor da massa do êmbolo, conjunto da cápsula e íman permanente, presente nas Equações 4.42 e 4.43, entre outras, foi estimado visto que o valor exato só seria possível determinar após a fase de prototipagem. Por isso, optou-se por um valor mais conservador.

Tal como foi apresentado na Secção [4.3.3], o íman permanente utilizado é de AlNiCo (liga de Fe(Ferro) com Al(Alumínio), Ni(Níquel) e Co(Cobalto)), grau N35. Assim, B_r é apresentado na Tabela 4.1, [60].

Tabela 4.1: Especificações do modelo

Var.	Descrição	Valor	Unidade
μ_0	Permeabilidade magnética do vazio	$4\pi \times 10^{-7}$	$\frac{T \cdot m}{A}$
B_r	Magnetismo residual	1,17	T
M	Massa do êmbolo	25×10^{-3}	kg
μ_{est}	Coefficiente de atrito estático	0,04	-
b	Constante de atrito	5	-
Esp	Espessura da cápsula do íman permanente	$1,5 \times 10^{-3}$	m
Des	Deslocamento necessário do êmbolo	$0,5 \times 10^{-3}$	m

Normalmente o curso total do êmbolo consiste em duas componentes: pré-deslocamento e deslocamento. O pré-deslocamento é a fase em que há uma força aplicada ao êmbolo, mas este ainda não tem movimento. É nesta fase que o atrito estático tem uma grande influência, e consequentemente quanto menor for o valor do coeficiente de atrito estático menor será a força que o solenóide deve vencer para iniciar o movimento do êmbolo. Para isso, e como já é utilizado em eletroválvulas existentes, o material escolhido para a cápsula do íman permanente é o teflon (PTFE), cujo coeficiente de atrito estático entre teflon - teflon está apresentado na Tabela 4.1.

Através da Figura 4.13, é possível ver a relação entre força de atração e a distância do íman permanente ao material ferromagnético, sendo esta distância proporcionada pela espessura da cápsula do íman permanente. Conclui-se que para uma espessura de

$1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ os valores de F_{i_e} e F_{i_d} , presentes na Equação 4.42 são, $F_{i_e} = 0.603 \text{ N}$ e $F_{i_d} = 0.363 \text{ N}$, resultando numa força de sustentação de 0.24 N .

Por último, mas não menos importante, na Secção [3.1.4] foi determinado o deslocamento mínimo, $x = 268 \mu\text{m}$, de modo a proporcionar o caudal de gás necessário. Contudo, devido a limitações a nível construtivo, como será visto adiante, e de modo a obter um modelo com características muito próximas das características do protótipo a desenvolver, define-se o deslocamento apresentado na Tabela 4.1.

4.5 Implementação em Simulink

Recorre-se ao software Matlab Simulink® para modelar cada um dos sistemas anteriormente estudados através de diagramas de blocos, para posteriormente, simular e analisar os comportamentos dinâmicos dos conceitos propostos.

Com esta ferramenta é possível ultrapassar os limites dos modelos lineares e explorar modelos não-lineares mais realistas. Sendo um software muito útil no desenvolvimento do presente trabalho, não só para testar a viabilidade dos modelos matemáticos apresentados, como também para tornar possível o estudo dos parâmetros do conceito final sem necessitar de recorrer a protótipos e testes funcionais que por vezes assumem custos elevados.

No início do presente Capítulo foram apresentados, na sequência de um processo de melhoria, três possíveis conceitos, todos eles implementados em Simulink, sendo o sistema proposto na Secção [4.3], o conceito a ser estudado.

Este modelo é composto por quatro sub-sistemas interligados, elétrico, magnético, mecânico e fluídico, como ilustrado na Figura 4.7. Cada sub-sistema é composto por blocos, que servem para expressar as equações características do modelo, aplicar sinais de entrada, processamento matemático, e ainda visualização dos sinais desejados.

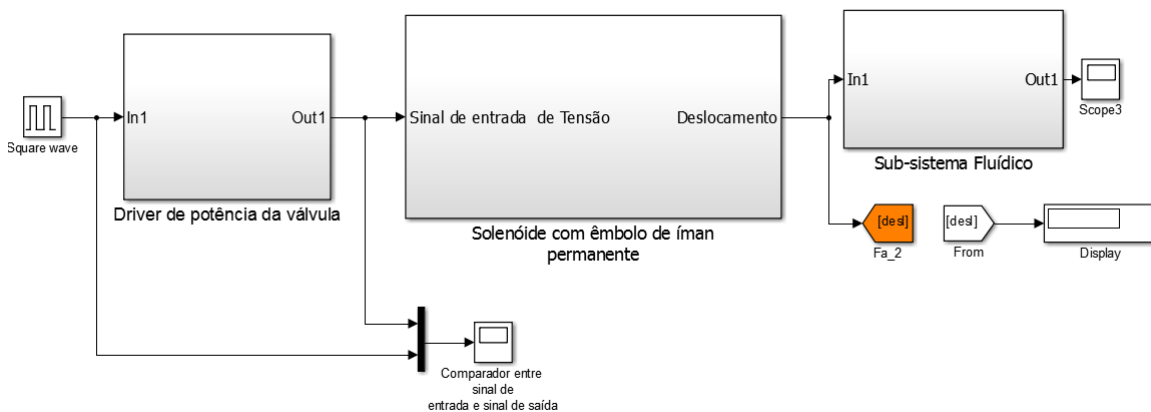


Figura 4.19: Diagrama de blocos - Simulink

A Figura 4.19, ilustra o sinal de entrada para o driver de potência (que é estudado mais adiante) e três sub-sistemas, nomeadamente: “*Driver de potência da válvula*”, “*Sub-sistema Fluídico*” e “*Solenóide com êmbolo e íman permanente*” que inclui os sub modelos elétrico, magnético, mecânico e máquina de estados estudados na Secção 4.3.

Parte III

Desenvolvimento e protótipo da válvula

Capítulo 5

Otimização de parâmetros e análise de resultados do modelo

5.1 Metodologia de otimização

Com a conclusão do modelo matemático do sistema proposto, e a sua implementação em Matlab-Simulink, foi possível realizar a validação do modelo através da análise do seu comportamento, nomeadamente o deslocamento em sentido positivo quando aplicado um sinal de tensão positiva e vice-versa e, ainda, a sustentação do êmbolo em dois estados (eletroválvula aberta e fechada), comprovando-se a bi-estabilidade do sistema. Assim, em primeiro lugar será feita uma otimização de parâmetros do modelo e, em seguida, a análise de resultados do sistema, de modo a avaliar o comportamento ótimo do modelo desenvolvido.

A melhor forma de reduzir os custos na produção do solenóide é reduzindo o seu tamanho, o que resulta numa menor quantidade de ferro e cobre utilizados (armação e enrolamento menores). A quantidade de energia elétrica ou a potência necessária para satisfazer as exigências tem uma grande influência nas características dimensionais. Quanto maior for a força/deslocamento exigida ao solenóide maior é a energia necessária para a converter em movimento linear. Assim, minimizando a força necessária para aplicar um deslocamento ao êmbolo (que também deve ser mínimo), irá reduzir significativamente o tamanho do solenóide necessário para a aplicação. O que é de todo vantajoso, visto que uma redução do tamanho leva a uma redução da massa do êmbolo em movimento, originando um tempo de resposta mais baixo. O mesmo se aplica à questão do consumo energético, sendo estes dois dos objetivos do presente desenvolvimento.

Assim, de forma a garantir a máxima performance do atuador com as menores dimensões possíveis, é necessário encontrar qual a combinação de parâmetros ideal do modelo. Desta forma, para realizar este processo de otimização é necessário predefinir os valores das variáveis. Numa primeira análise, onde foram estabelecidos esses valores de forma intuitiva, teve-se em conta os aspetos construtivos, dimensões do íman permanente adquirido e algumas conclusões que foram retiradas no decorrer da construção do modelo matemático, como por exemplo: o espaçamento em vazio, que deve ser o menor possível para obter uma relutância do fluxo magnético não muito elevada, e o posicionamento de um dos polos do íman permanente no centro do solenóide, onde a intensidade do campo magnético é máxima.

Estas variáveis, apresentadas na Tabela 5.1, são também ilustradas pela Figura 5.1. Na Secção 4.4.1 foram especificados os parâmetros que não estão sujeitas ao processo de otimização.

Tabela 5.1: Valores de dimensões iniciais

Var.	Descrição	Valor	Unidade
r_m	Raio do êmbolo do solenóide	2×10^{-3}	
l_m	Comprimento do êmbolo	10×10^{-3}	
R_i	Raio interno do enrolamento	4×10^{-3}	
R_0	Raio externo do enrolamento	9×10^{-3}	
L_c	Comprimento do enrolamento	15×10^{-3}	m
r	Raio do orifício da armação	3×10^{-3}	
W	Espessura da armação	1×10^{-3}	
h	Altura do núcleo ferromagnético	6×10^{-3}	
ϕ_{fio}	Diâmetro do fio de cobre	$0,132 \times 10^{-3}$	

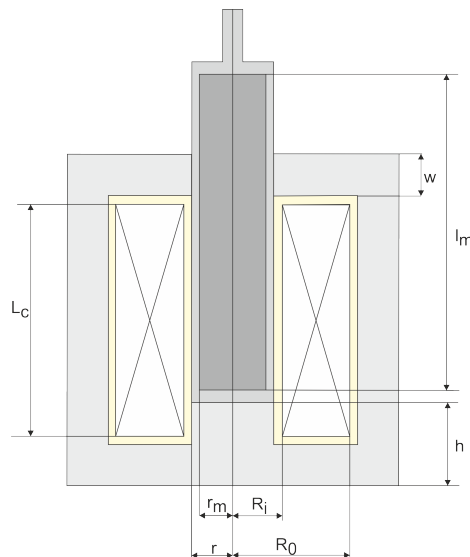


Figura 5.1: Características geométricas do modelo em estudo

Todas as simulações realizadas, tem um sinal de entrada de 0 a 15 [V], como é posteriormente apresentado.

Dada a quantidade de parâmetros a otimizar, começou-se por variar o número de espiras do enrolamento, N no intervalo [2000 6000], e a resistência do enrolamento, R entre [150 250] Ω , como ilustra a Figura 5.2. Pelas Equações 4.54 à 4.57, conclui-se que estes dois parâmetros representam as variáveis R_i , R_0 , L_c e ϕ_{fio} .

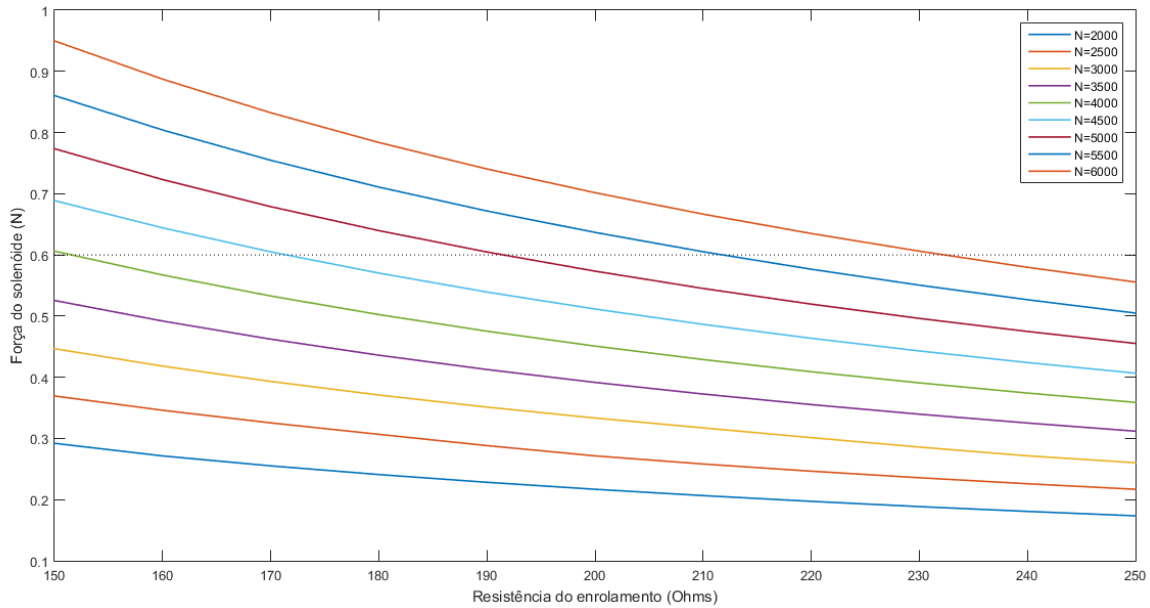


Figura 5.2: Relação entre força do solenóide, número de espiras e resistência.

Após a simulação e análise da força resultante do modelo Simulink ao longo do deslocamento pretendido é possível inferir que a força do solenóide deve ser aproximadamente 0.6 N (fator de segurança devidamente incluído). Esta força é representada pela linha horizontal da Figura 5.2.

A Tabela 5.2 resume os valores das combinações entre o número de espiras e resistência do enrolamento que torna possível obter a força do solenóide desejada. É de notar que todas as combinações resultam na mesma força do solenóide, com valores de intensidade de corrente diferentes e, conseqüentemente, consumos energéticos diferentes. Os valores da intensidade de corrente foram retirados da simulação.

Tabela 5.2: Valores retirados da Figura 5.2

Número de espiras	Resistência do enrolamento [Ω]	Intensidade de corrente [A]
6000	232,8	0,069
5500	211,6	0,075
5000	191,4	0,083
4500	171,2	0,092
4000	152	0,103

Neste momento deve-se variar o diâmetro do fio e a área de secção do solenóide, Equação 4.54, de modo a determinar as combinações capazes de proporcionar o número de espiras da Tabela 5.2.

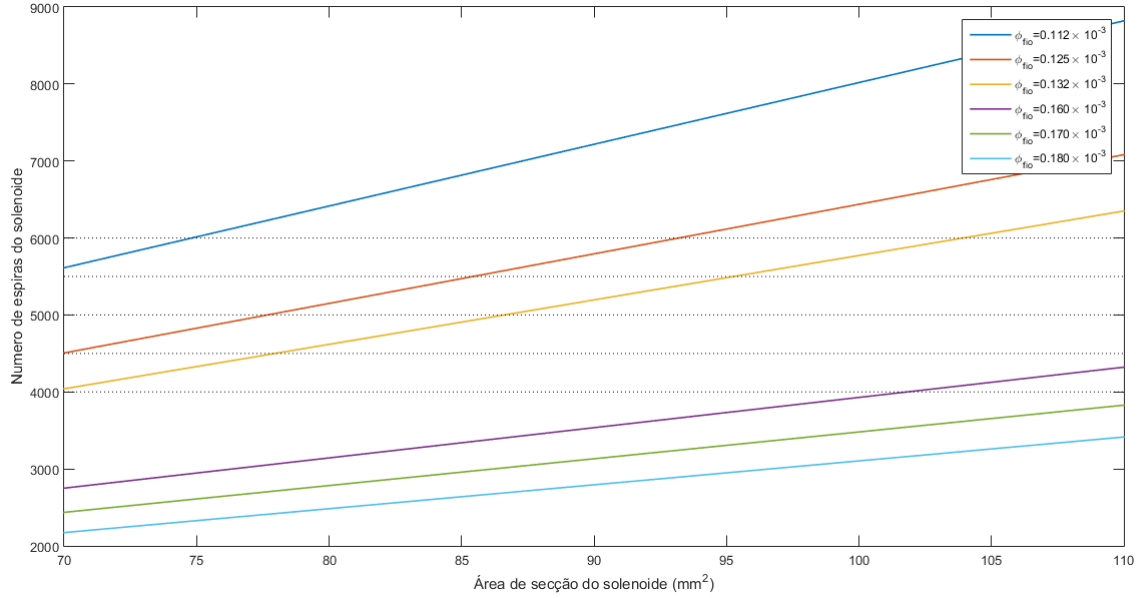


Figura 5.3: Relação entre número de espiras, área de secção do enrolamento e diâmetro do fio de cobre.

A partir da Figura 5.3, para um determinado número de espiras, é possível obter as várias combinações entre o diâmetro do fio de cobre utilizado e a área de secção do solenóide, colunas 1, 2 e 3 da Tabela 5.3.

Com o valor da área de secção do solenóide, e a partir da Equação 4.56, é possível determinar o raio exterior do solenóide como

$$R_0 = \frac{A_{\square}}{L_c} R_i \quad (5.1)$$

Dadas as dimensões do íman permanente e da sua cápsula, R_i permanece igual ao valor apresentado na Tabela 5.1.

É de notar também que, para o mesmo número de espiras do solenóide, são possíveis várias combinações entre o comprimento, raio interno e externo deste. Com este estudo verificou-se que a relação $\frac{L_c}{R_0 - R_i}$ influencia o comprimento de cobre necessário para o mesmo número de espiras. Quanto maior for o valor dessa relação menor é o comprimento do fio de cobre, admitindo assim um valor da resistência do enrolamento menor. Portanto, o valor de L_c apresentado na Tabela 5.1, não sofre alterações.

Assim, pela Equação 5.1 determina-se o raio exterior do solenóide, R_0 , e pelas Equações 4.56 e 4.57, é determinado o número de espiras, N , e resistência, R , para cada uma das combinações da Figura 5.3.

Pela Tabela 5.3, pode observar-se que algumas combinações apresentam a mesma intensidade de corrente, mas com valores de força do solenóide inferiores, tais combinações podem ser excluídas de imediato. Os valores de força do solenóide e intensidade de corrente foram retirados de diferentes simulações para os respetivos parâmetros.

Tabela 5.3: Valores retirados da Figura 5.3

Tabela 5.2	ϕ_{fio} [mm]	A_{\square} mm ²	R_0 [mm]	N	R [Ω]	$F_{sol}(i, x)$ [N]	I [A]	Combinação
N=6000 R=232,8	0,112	75	9	6006	415,62	0,33	0,04	1
	0,125	93	10,2	6012	365,7	0,38	0,04	2
	0,132	104	11	6021	345,2	0,40	0,05	3
N=5500 R=211,6	0,125	85	9,7	5497	321,9	0,39	0,05	4
	0,132	96	10,4	5513	303,7	0,41	0,05	5
N=5000 R=191,4	0,125	78	9,2	5001	281,9	0,40	0,06	6
	0,132	87	9,8	4999	264	0,43	0,06	7
N=4500 R=171,2	0,125	70	8,7	4506	244	0,42	0,06	8
	0,132	78	9,2	4508	228	0,45	0,07	9
N=4000 R=152	0,132	70	8,7	4041	196,3	0,46	0,08	10
	0,160	102	10,8	4004	154,6	0,59	0,1	11

Em jeito de conclusão, apesar da combinação 11 apresentar uma corrente superior às restantes (implica um consumo energético superior), é a que se apresenta como a melhor pelas seguintes razões: apresenta um valor de força próximo do idealizado para o solenóide, apresenta o valor de resistência obtido muito próximo do valor teórico presente na coluna 1, e ainda, pelo modelo elaborado, é possível verificar que possui um tempo de resposta mais baixo.

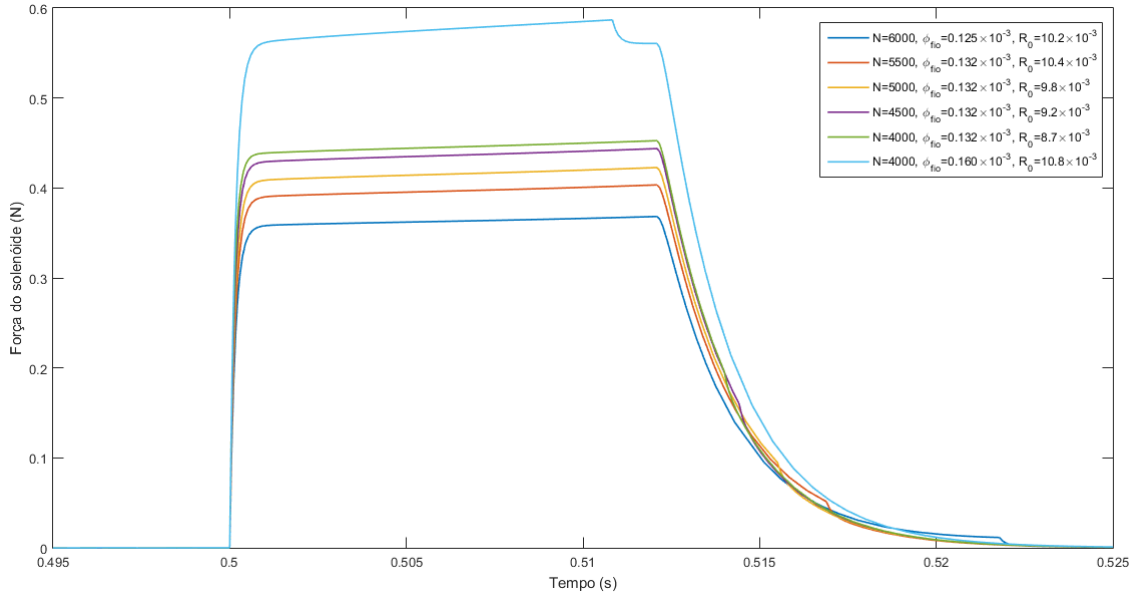


Figura 5.4: Comparação do desempenho entre as combinações com mais potencial

Após definidos os valores de N , ϕ_{fio} e R_0 ideais para o modelo, é oportuno determinar o valor da espessura da armação, W , e a altura do núcleo ferromagnético do solenóide, h . Para isso, fez-se variar W no intervalo $[1 - 4] \text{ mm}$ e, h no intervalo $[3 - 8] \text{ mm}$, como se pode ver pela Figura 5.5.

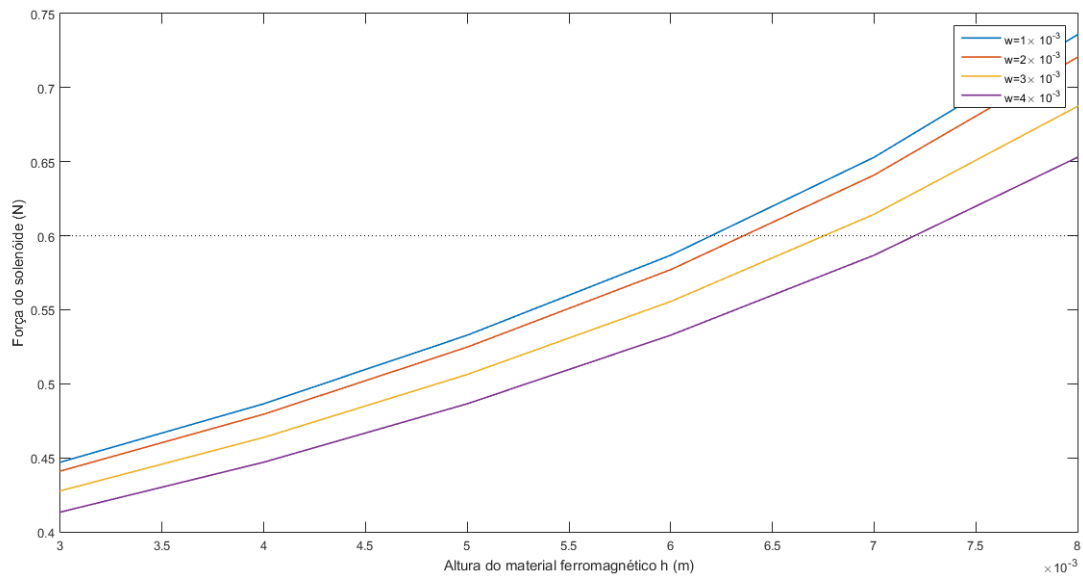


Figura 5.5: Relação entre espessura da armação, altura do núcleo e força do solenóide

Tendo em conta os aspetos construtivos, optou-se por uma espessura não inferior a 3 mm , que corresponde a $h = 6.7\text{ mm}$.

Após a conclusão da otimização dos parâmetros, algumas das variáveis não sofreram alterações, mas outras, possuem agora o valor ideal.

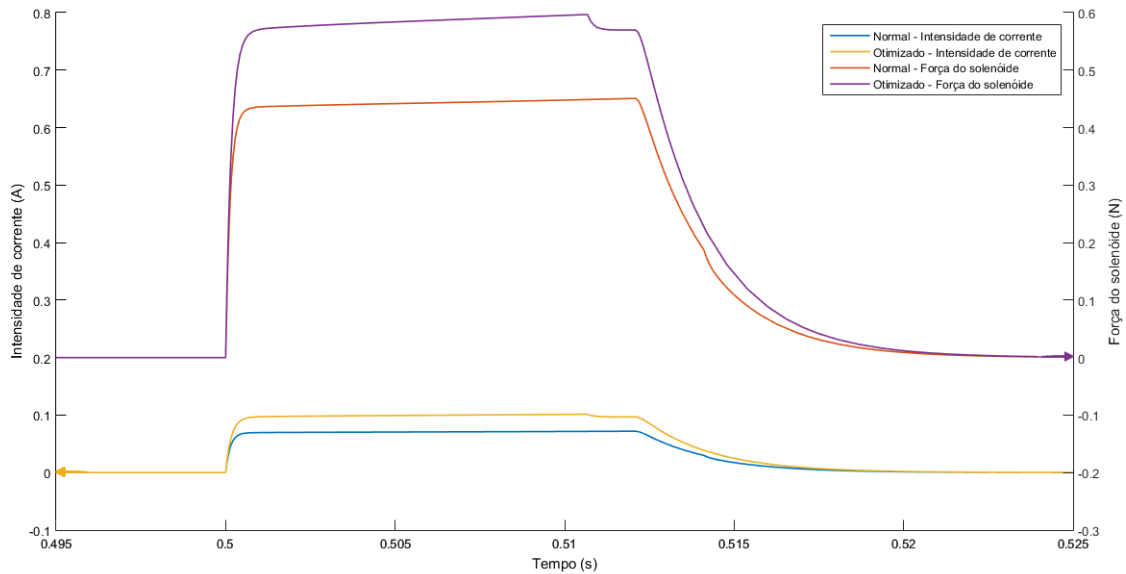


Figura 5.6: Comparação entre o antes e o após a otimização

Na Figura 5.6, é efetuada uma comparação entre os resultados obtidos de uma simulação antes e outra após a otimização de parâmetros do modelo.

Note-se que apesar do baixo aumento da intensidade de corrente, a força do solenóide foi significativamente aumentada, assim como reduzido o tempo de resposta.

A Tabela 5.4, reúne todos os parâmetros geométricos úteis na fase de modelação abordada no Capítulo 6.1.

Tabela 5.4: Resumo dos parâmetros geométricos - Figura 5.1

Designação	Valor	Unidade
r_m	2×10^{-3}	
l_m	10×10^{-3}	
R_i	4×10^{-3}	
R_0	$10,8 \times 10^{-3}$	
L_c	15×10^{-3}	m
r	3×10^{-3}	
W	3×10^{-3}	
h	$6,7 \times 10^{-3}$	
ϕ_{fio}	$0,160 \times 10^{-3}$	

5.2 Análise de resultados do modelo otimizado

Após a conclusão do Capítulo 5.1, o valor das variáveis do modelo construído em Matlab-Simulink são atualizados para os valores otimizados.

As Figuras que se seguem resultam de simulações do modelo do conceito, que demonstram o comportamento do sistema.

Ao aplicar um sinal de onda quadrada ao circuito de alimentação obtém-se o sinal ilustrado na Figura 6.9 do próximo capítulo. A intensidade de corrente e força do solenóide resultantes desse sinal, são apresentados na Figura 5.7.

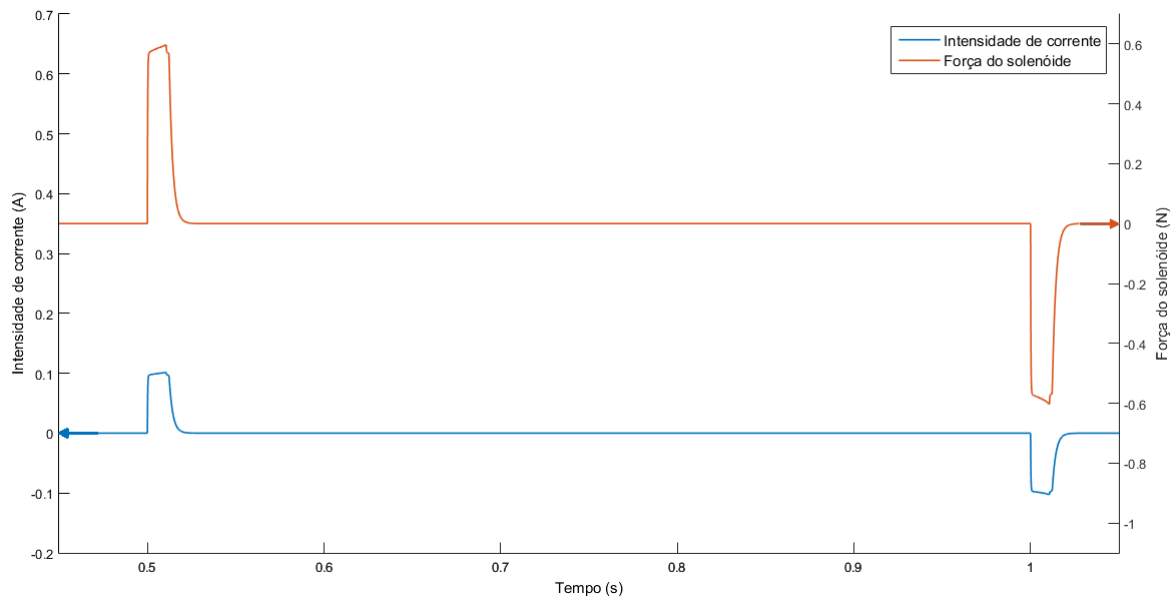


Figura 5.7: Intensidade de corrente e força do solenóide

A força do solenóide, sobre-dimensionada de forma a garantir um coeficiente de segurança, como foi abordado anteriormente, provoca um deslocamento no êmbolo. Note-se que na Figura 5.8, o deslocamento inicia em $1,5\text{ mm}$ e finda a 2 mm , devido à cápsula do íman permanente que tem uma espessura de $1,5\text{ mm}$, como referido anteriormente.

O êmbolo possui um deslocamento de $0,5\text{ mm}$, valor de abertura da válvula suficiente para proporcionar o caudal de gás necessário.

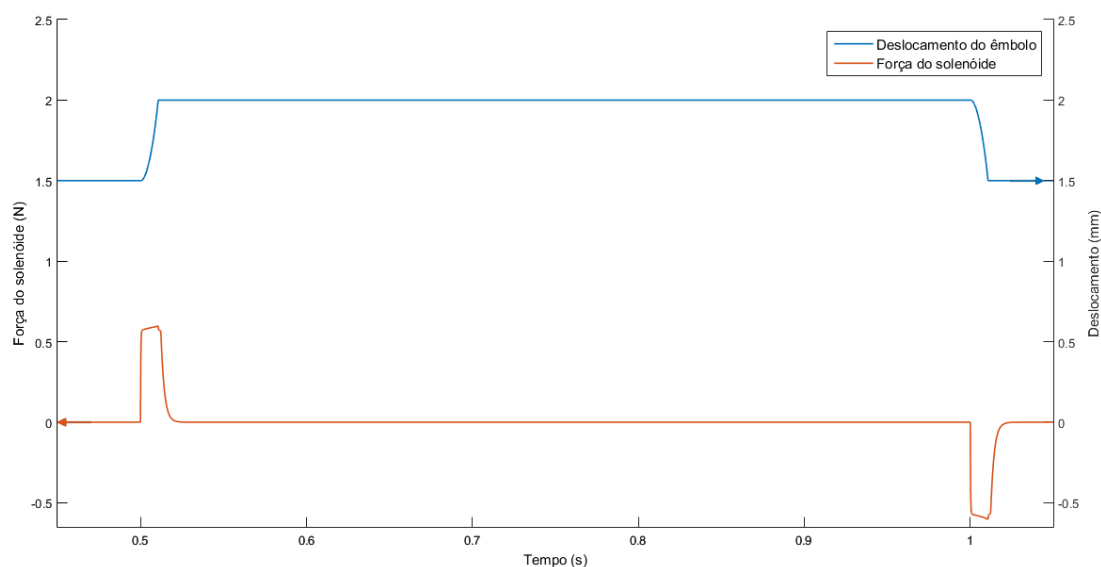


Figura 5.8: Força do solenóide e deslocamento

A Figura 5.9 representa a força entre o íman permanente e os seus fins de curso em material ferromagnético, e a transição da posição do êmbolo, provando a bi-estabilidade do sistema.

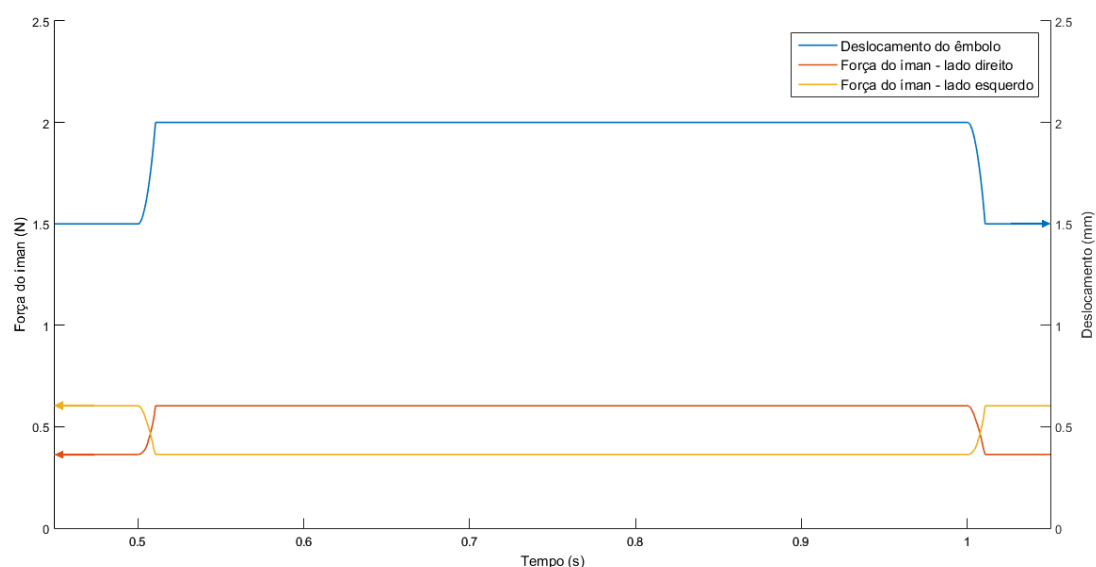


Figura 5.9: Deslocamento e força de atração do íman permanente

Aliadas às forças de atração do íman permanente, Figura 5.9, existem outras, como a força de atrito (estático e dinâmico) e a força do solenóide, como já foi referido. Surge assim a curva da força resultante, presente na Figura 5.10.

Como se pode analisar pela Figura 5.10, o sinal de corrente começa a diminuir mesmo antes de o êmbolo atingir a posição mais afastada. A partir do instante em que o êmbolo (íman permanente) atinge uma posição suficientemente próxima do material ferromagnético é possível parar de alimentar o enrolamento, visto que a força de atração entre o íman e o material ferromagnético a jusante é capaz de finalizar o movimento.

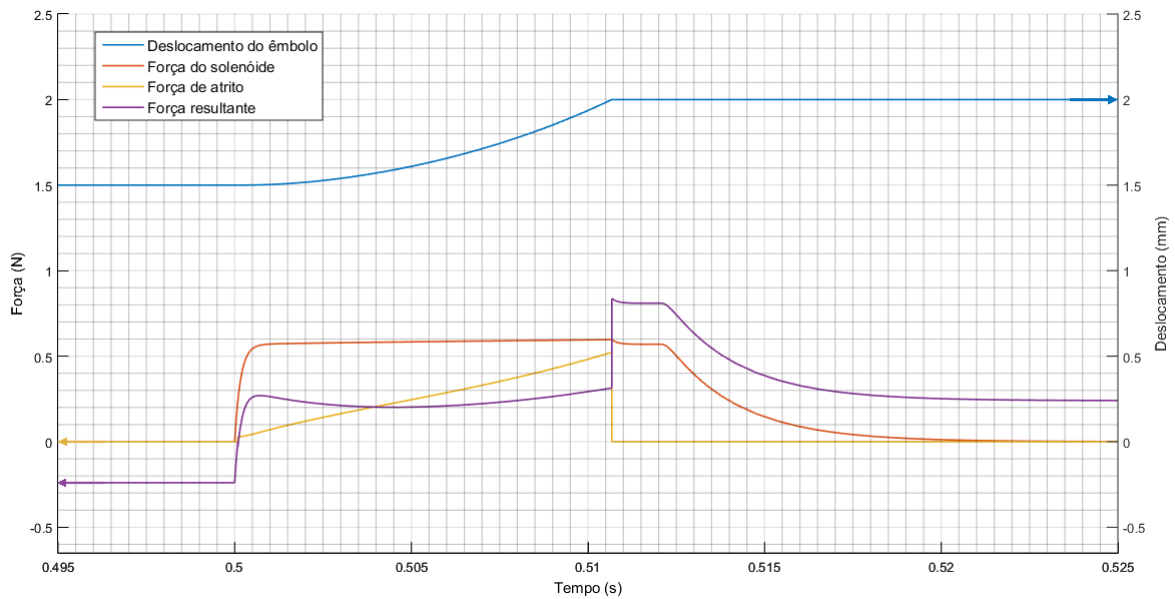


Figura 5.10: Forças presentes no sistema

A partir da Figura 5.10 é possível determinar que o tempo de resposta do êmbolo a um impulso é de aproximadamente $10,7\text{ ms}$.

A bi-estabilidade do conceito é provada também pela análise da linha de força resultante da Figura 5.10. Esta possui um valor negativo antes do impulso de tensão, e quando o êmbolo atinge o deslocamento máximo admite um valor positivo, sendo responsável por manter o êmbolo nas duas posições estáveis enquanto o enrolamento não for energizado.

Capítulo 6

Desenvolvimento do protótipo

6.1 Modelação e desenhos de fabrico

Ao longo da presente dissertação, o trabalho de desenvolvimento do conceito foi progredindo. Assim, de apenas conceitos teóricos foram surgindo valores das variáveis presentes no modelo simulado, Tabela 5.4 do Capítulo 6.3.

Recorrendo a ilustrações como a Figura 5.1, e utilizando o software de modelação SolidWorks, é possível iniciar a modelação do sistema simulado.

Ao desenvolver o modelo tridimensional do futuro protótipo, questões de redução de custos foram tidas em conta bem como, por exemplo, evitar geometrias complexas e assim reduzir a sofisticação dos processos de produção, e ainda a tentativa de reduzir e simplificar as operações de montagem do protótipo.

6.1.1 Proposta concetual

Com o decorrer das simulações, tornou-se claro que a diminuição dos espaços em vazio no circuito magnético, rentabiliza o sistema de atuação, devido às relutâncias envolvidas no sistema. Contudo, as limitações das técnicas de prototipagem utilizadas restringem algumas das dimensões ideais. Por isso, após atingir um compromisso entre os dados simulados e as limitações construtivas, surge o modelo apresentado nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

Podem ser consultados com mais detalhe os desenhos de conjunto e de vista explodida no Apêndice A.

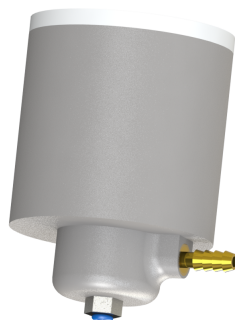


Figura 6.1: Fotorrealismo da eletroválvula

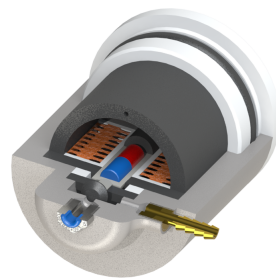


Figura 6.2: Corte transversal

Uma das etapas mais importante, no decorrer do desenvolvimento do modelo CAD é garantir a vedação total da eletroválvula, prevenindo assim fugas indesejáveis de gás. A configuração atual é a que menor influência apresenta à dinâmica do êmbolo, visto que a outra possibilidade seria posicionar o vedante (componente 16) junto do êmbolo, que consequentemente aumentava a força de atrito no êmbolo.

A Figura 6.3 apresenta uma vista explodida da proposta conceptual, sendo os componente standard 3 e 4, Conector BSP fêmea e Conector BSP macho, respetivamente. O corpo da válvula, componente 5, serve de estrutura principal, onde são montados todos os restantes componentes pela sequência ilustrada.

Os componentes 12 e 13 dizem respeito ao solenóide, que deve ser fabricado com os seguintes parâmetros:

- Raio interno: $R_i = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Raio externo: $R_e = 10.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Comprimento: $L = 15 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Diâmetro do fio: $\phi_{fio} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}$

originando assim,

- Resistência do enrolamento: $R = 154.8 \Omega$
- Número de espiras do enrolamento: $N = 4000$

Através da análise em Matlab-Simuink sabe-se que é necessária uma potência de aproximadamente 1.5 W durante cerca de 16 ms .

O vedante é também um componente normalizado, sendo designado por $D \times d = 26.2 \times 3.6 \text{ mm}$.

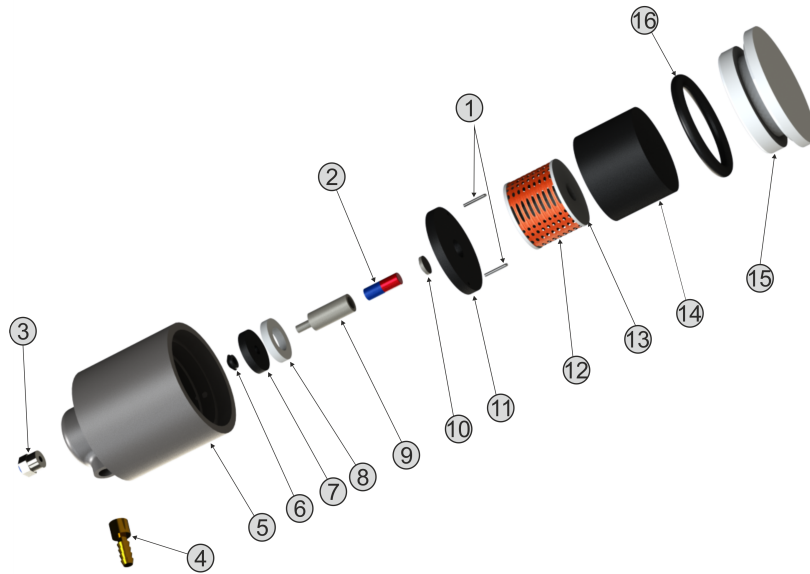


Figura 6.3: Vista explodida

6.1.2 Proposta simplificada

Dada a carência de tempo até ao término dos trabalhos, decidiu-se testar apenas o atuador (conceito de bi-estabilidade), velocidade de resposta e o seu baixo consumo, pondo de parte a componente fluídica anteriormente estudada, optando por adquirir componentes como o solenóide, com características aproximadas em vez de bobinar um com os parâmetros ideais, com um valor de resistência do enrolamento de aproximadamente $63\ \Omega$, e posteriormente inserir os valores do solenóide adquirido na simulação já existente e comparar resultados. Os restantes componentes necessários à construção, foram produzidos no Departamento de Engenharia Mecânica.

Surge então a necessidade de construção de um protótipo relativamente simples que permita validar o conceito do trabalho desenvolvido. Assim, pode-se ter em conta a Figura 6.4 que ilustra uma vista explodida da proposta a fabricar. Podem ser consultados com mais detalhe os desenhos de conjunto e de definição dos componentes, no Apêndice B.

É de notar que na Figura 6.4 os componentes 1 e 3 têm função meramente estrutural, e são fabricados em Nylon. O componente 2 é uma representação meramente ilustrativa do solenóide adquirido. Os restantes componentes não foram numerados dado que foram abordados na proposta concetual anterior.

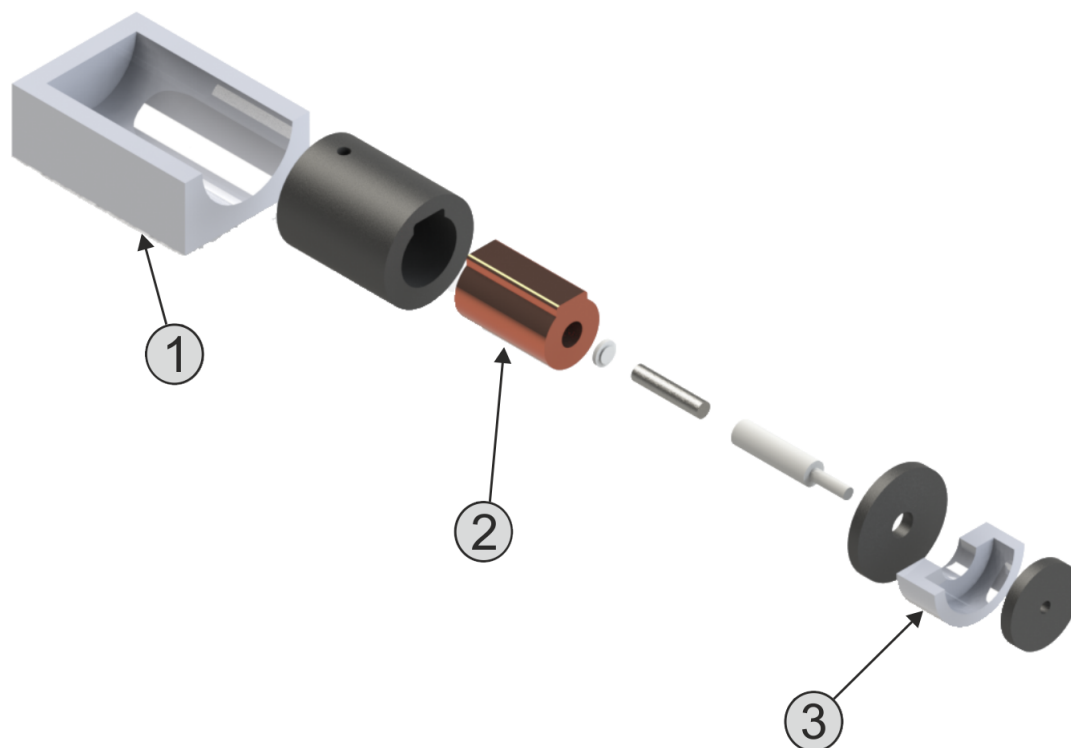


Figura 6.4: Vista explodida dos componentes a prototipar

6.2 Prototipagem

O protótipo foi desenvolvido no Laboratório de Tecnológica Mecânica Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Recorreu-se à tecnologia existente, nomeadamente à Fresadora CNC e ao torno convencional para produzir cada um dos componentes ilustrados nas Figuras 6.5b e 6.6.

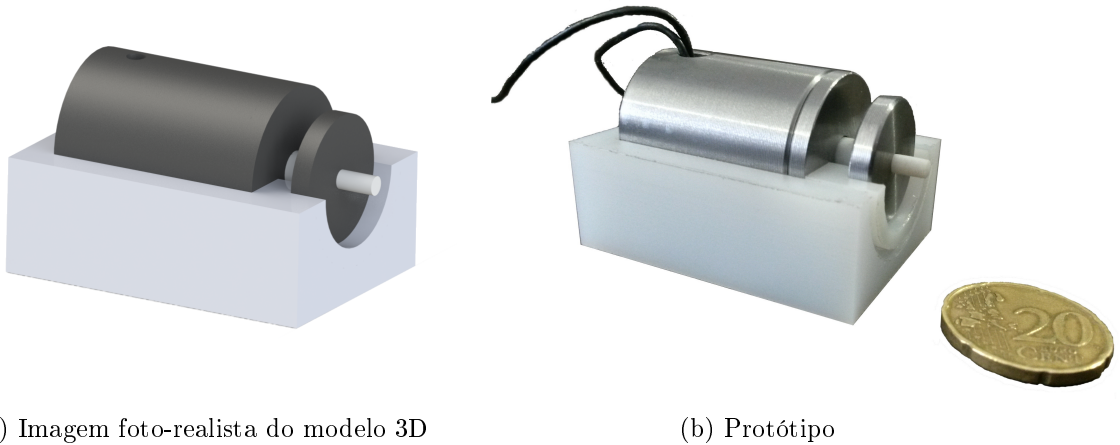


Figura 6.5: Comparação entre modelo 3D e protótipo

A moeda ilustrada na Figura 6.5b, serve apenas para usar como referência escalar entre esta e o protótipo.

É de notar que na Figura 6.6, o solenóide (componente número 2 ilustrada na Figura 6.4) já se encontra montado na sua armação.

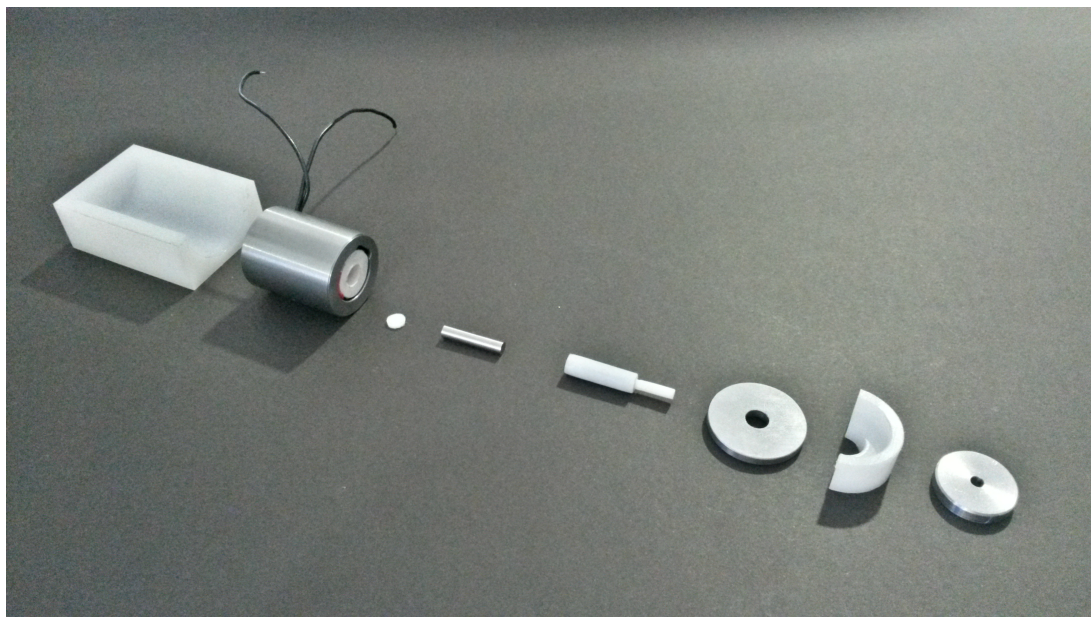


Figura 6.6: Vista geral dos componentes prototipados

6.3 Driver de potência da eletroválvula

Tal como foi abordado anteriormente, é necessário inverter o sentido da intensidade de corrente aplicada aos terminais do solenóide para que o fluxo magnético seja invertido e assim obter uma força em sentido contrário.

O objetivo do trabalho desenvolvido nesta secção é essencialmente um processamento de sinal, de modo a obter um sinal como o ilustrado na Figura 6.7.

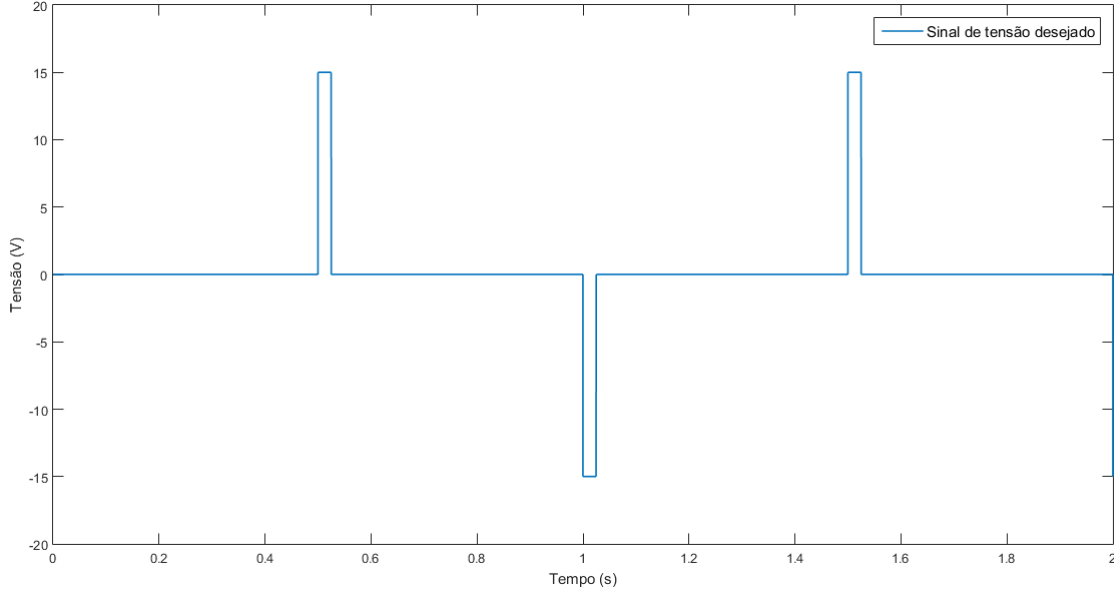


Figura 6.7: Sinal de tensão teórico

Surge assim a necessidade de recorrer a um circuito diferenciador implementado com recurso a um amplificador operacional, Figura 6.8. Neste circuito a tensão de saída, V_s , é proporcional à derivada da tensão de entrada, V_{in} . Sendo um circuito que realiza uma operação matemática de diferenciação, torna possível detetar as variações de tensão de uma onda quadrada (sinal de entrada) com amplitude de 0 a 5V, obtendo um sinal de saída de -15 a +15V, devido à alimentação dos amplificadores operacionais do circuito ilustrado.

Na Figura 6.8 o circuito amplificador diferenciador faz-se acompanhar por um circuito que introduz um ganho de R_3/R_2 , que irá aumentar a largura do impulso do sinal de saída, V_{out} .

A partir da Figura 6.8, é possível obter a equação que caracteriza a função do circuito como

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2} \cdot R_1 C_1 \cdot \frac{dV_{in}}{dt} \quad (6.1)$$

Com isto é possível implementar a Equação 6.1 em Matlab-Simulink de forma a simular o sinal obtido, sendo este sinal aplicado ao restante modelo do conceito, como ilustrado na Secção 4.5. A Figura 6.9, apresenta a onda obtida após a simulação.

A onda resultante, mantém a eletroválvula numa das posições estáveis quando a onda de entrada do circuito se encontra a 5V, e transita para a outra posição estável quando a onda passa de 5 a 0V.

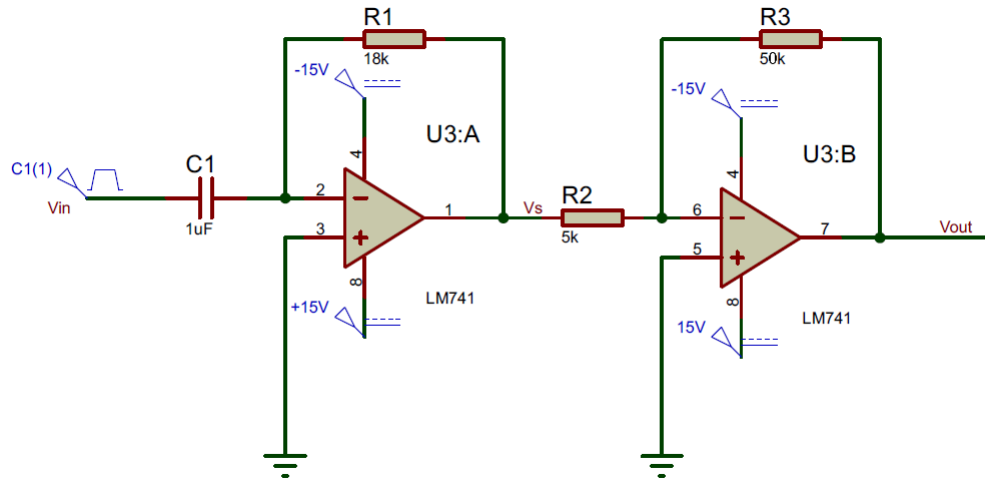


Figura 6.8: Driver de potência da eletroválvula

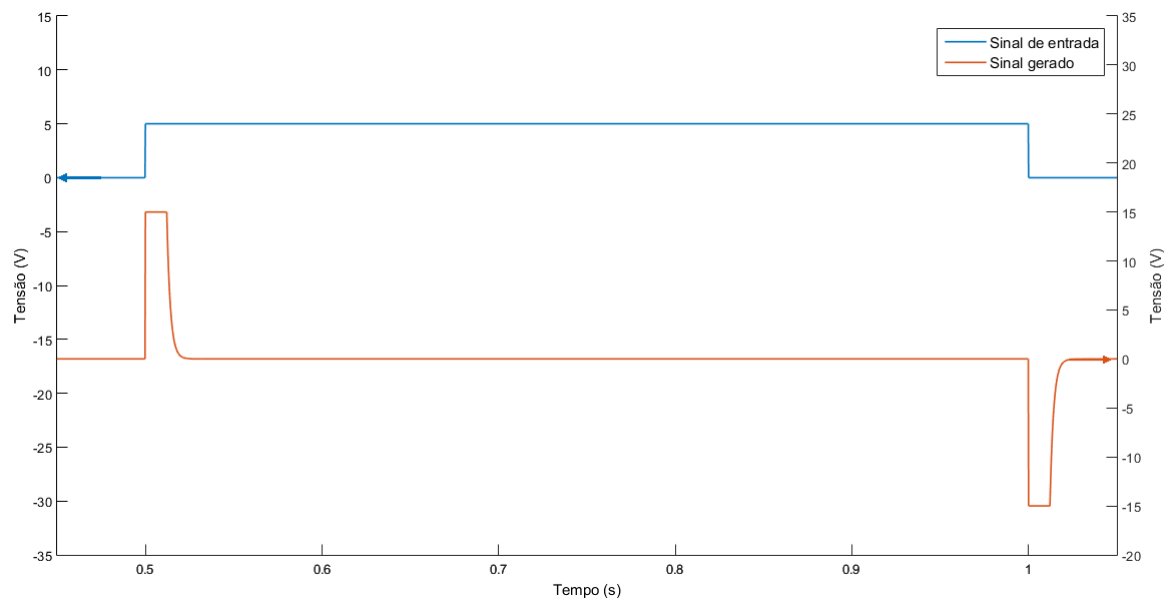


Figura 6.9: Sinal de onda obtido em ambiente simulado

A última etapa diz respeito à implementação do circuito na *breadboard* (placa branca), Figura 6.10, que posteriormente será ligado ao protótipo da eletroválvula desenvolvida.

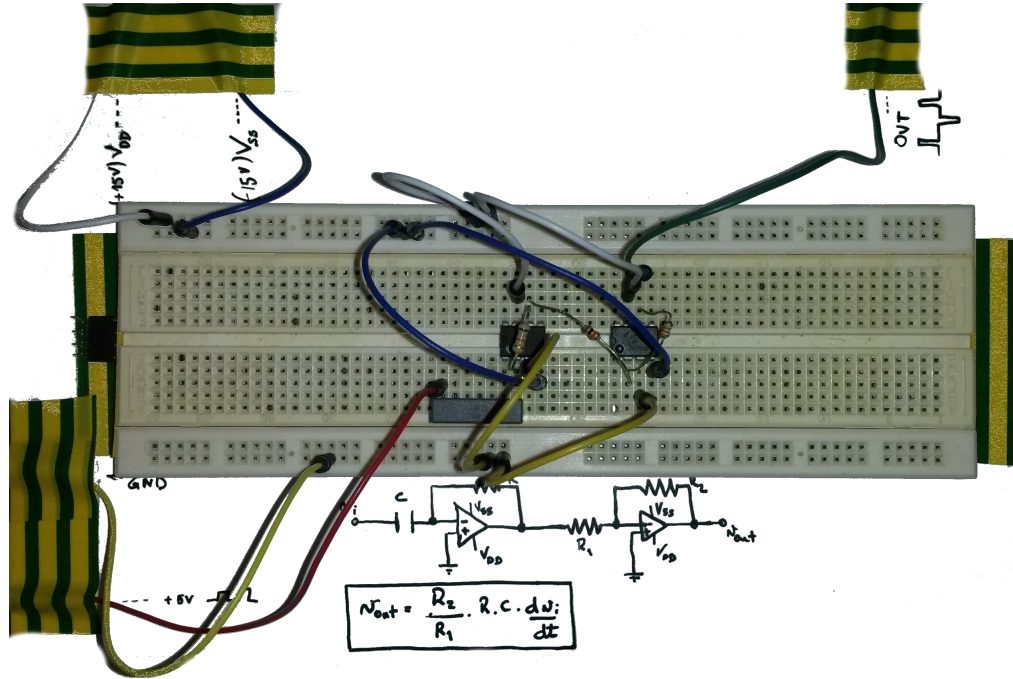


Figura 6.10: Circuito do driver de alimentação

Recorrendo a um gerador de sinais para obter uma onda quadrada e a uma fonte de alimentação, para aplicar $-15V$ e $+15V$ aos terminais dos amplificadores operacionais, é possível, através de um osciloscópio, observar a forma do sinal de onda obtido, Figura 6.11.

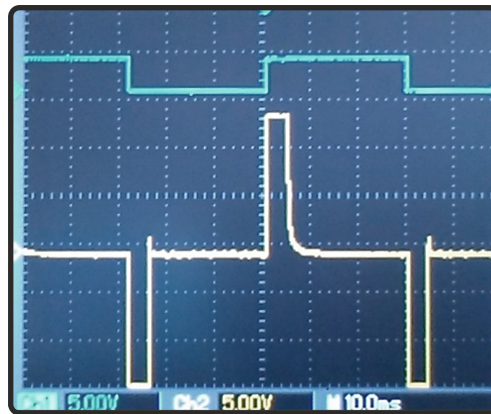


Figura 6.11: Sinal de onda obtido

O tempo em que o sinal gerado se encontra a $-15V$ ou $+15V$ é de aproximadamente 5 ms e é definido pela constante de tempo $R_1 \cdot C_1$.

No decorrer dos testes experimentais, abordado no Capítulo 7, foi possível concluir que o *driver* de potência ilustrado na Figura 6.10, apresenta uma constante de tempo

inferior à necessária, e ainda, uma intensidade de corrente de saída do circuito abaixo do exigido pelo solenóide, devido à utilização de amplificadores operacionais LM741 que proporcionam uma corrente de saída baixa. Com isto, na Figura 6.12 são apresentadas as alterações efetuadas, de forma a tornar o *driver* funcional para a aplicação.

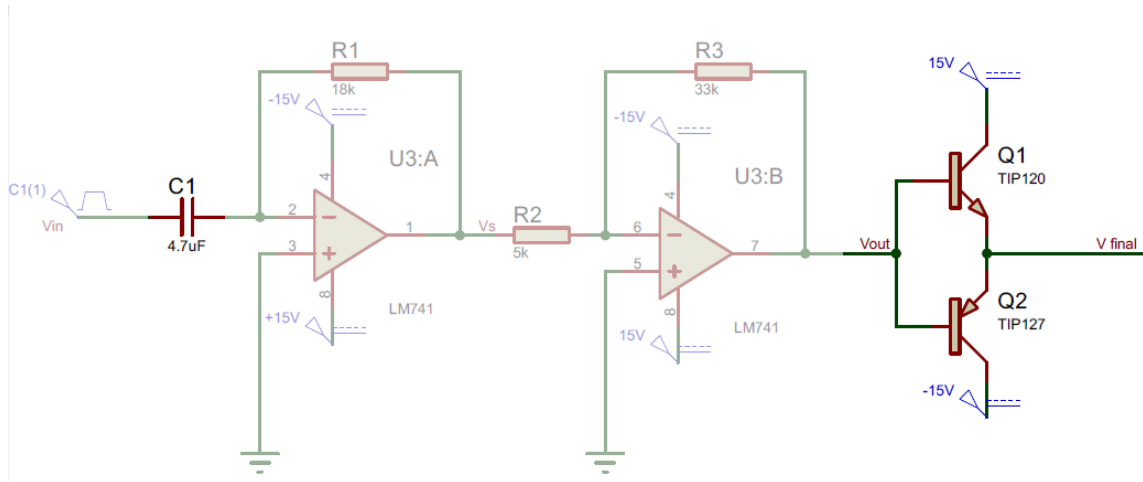


Figura 6.12: Driver de potência da electroválvula corrigido

Utilizou-se um condensador cerâmico com uma carga superior, $C_1 = 4,7\mu F$, de modo a aumentar a constante de tempo e ainda, o acrescento de um *driver* com dois transístores de potência (NPN e PNP) de modo a amplificar a corrente de saída, Figura 6.13.

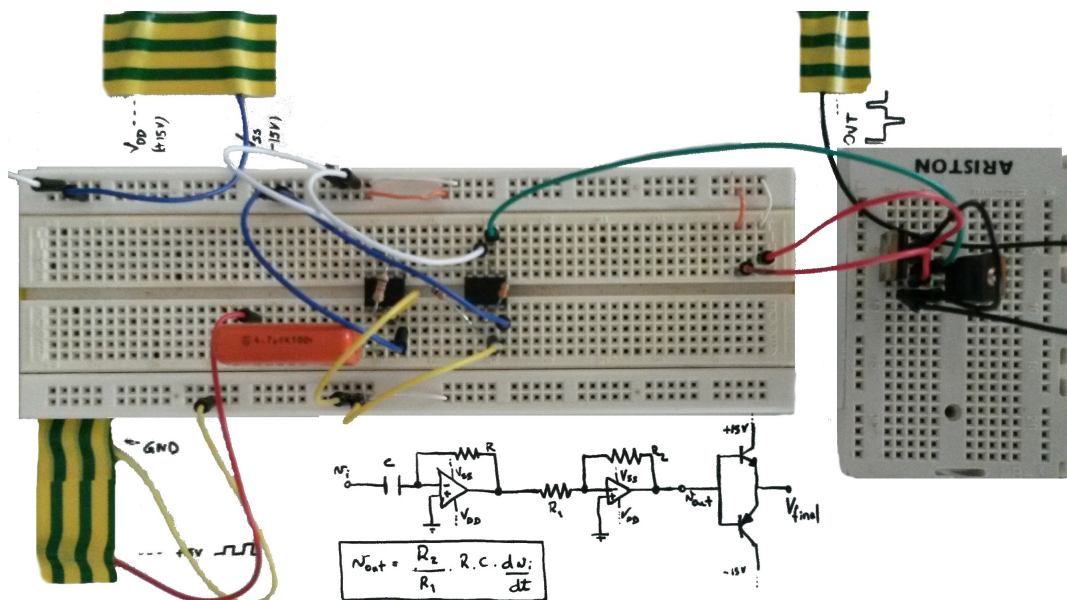


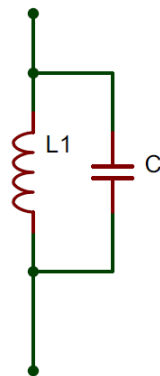
Figura 6.13: Circuito do driver de alimentação corrigido

O sinal obtido do *driver* de potência atual, é representado pelo Figura 6.14 e o tempo em que o sinal gerado se encontra a $-15V$ ou $+15V$ é de aproximadamente 20 ms . É de notar que o circuito foi testado já com os terminais do solenóide do protótipo ligados, sendo essa a razão pela qual o sinal apresenta ruído, nomeadamente após as variações bruscas na corrente.



Figura 6.14: Sinal de onda atual

Este problema poderia ser resolvido com um circuito denominado por *Flyback diode*, mas como a tensão alterna entre -15 V e $+15\text{ V}$, deve-se recorrer a um condensador implementado paralelamente com os terminais do solenóide, tendo o papel de filtrar o ruído indesejado, Figura 6.15a. Obtendo o sinal de onda ilustrado na Figura 6.15b.



(a) Ligação do condensador ao solenóide



(b) Sinal de onda final

Figura 6.15: Optimização do *driver* da válvula

Parte IV

Resultados e Discussão

Capítulo 7

Metodologia experimental

Com o protótipo finalizado, é oportuno submeter o mesmo a testes experimentais de forma a comparar os resultados com os valores obtidos através das simulações em Matlab-Simulink, para perceber os desvios entre o que é simulado e o que é real, e assim melhorar o modelo construído inicialmente ou fazer as alterações que se mostrarem pertinentes.

Após ligar os terminais do enrolamento do solenóide ao driver de potência da eletroválvula, aplica-se o sinal de tensão gerado e espera-se observar um deslocamento do êmbolo, como ilustrado pela Figura 7.1.

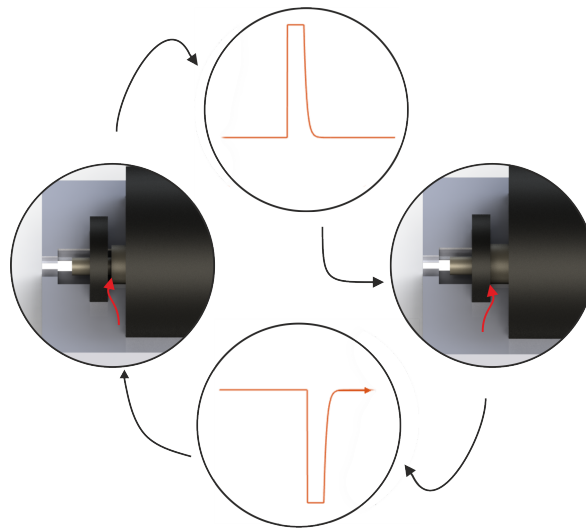


Figura 7.1: Diagrama de funcionamento do atuador

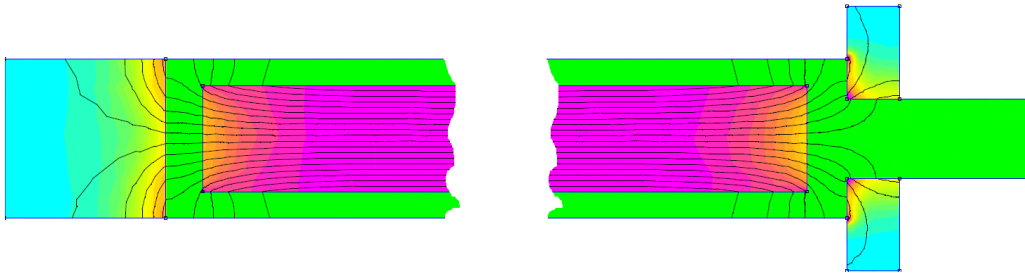
Como um dos objetivos é o baixo consumo energético, serão efetuadas medições de intensidade de corrente aos terminais do solenóide.

É oportuno também realizar um estudo sobre a força produzida pelo atuador prototipado. Para isso, deve-se recorrer a uma máquina de medição de força devidamente calibrada e verificar se se aproxima do valor obtido através das simulações, 0.6 N .

7.1 Resultados obtidos

Concluída a ligação dos terminais do solenóide às saídas do *driver* de potência, foi possível observar que o comportamento do protótipo era o esperado, tal como analisado nos gráficos das simulações realizadas anteriormente. Com o sinal de onda ilustrado na Figura 6.15b, o protótipo apresenta duas posições estáveis (eletroválvula aberta e fechada), tal qual a Figura 7.1, com consumo energético apenas na transição entre posições.

O êmbolo possui duas posições estáveis asseguradas pela força de atração entre íman permanente (êmbolo) e o material ferromagnético. Com o decorrer dos ensaios práticos, foi possível constatar que a força de sustentação do êmbolo, quando este se encontra recuado é superior à força quando este apresenta o deslocamento máximo. Este facto pode ser explicado pela análise seguinte, Figura 7.2, onde está presente o êmbolo (cor roxa), a sua cápsula (cor verde) e o material ferromagnético (cor azul).



(a) Posição estável - êmbolo recuado

(b) Posição estável - êmbolo avançado

Figura 7.2: Análise do campo magnético entre o íman permanente e material ferromagnético nas duas posições estáveis

Com o êmbolo na posição máxima, o material ferromagnético tem um furo concêntrico com a face do íman permanente que serve de guiamento à sua cápsula, alterando as linhas de campo magnético e, consequentemente, a sua força de atração.

Através da Figura 6.15b, sabe-se que o sinal aplicado tem uma tensão de $+15V$ ou $-15V$ durante 20 ms , apenas durante as transições. Com recurso a um multímetro, foi possível determinar a intensidade de corrente consumida pelo solenóide, 0.23 A . Assim, é possível determinar a potência como

$$P = V \cdot I = 3,45\text{ W} \quad (7.1)$$

obtendo assim um consumo energético de $3,45\text{ W}$ durante aproximadamente 20 ms para cada transição, que pode ser traduzido, em:

$$\text{Energia} \left[\frac{W}{s} \right] = P \cdot \Delta T = 3,45 \cdot 20 \times 10^{-3} = 69\text{ mJ} \quad (7.2)$$

A análise da força através da metodologia referida anteriormente foi impossível realizar, devido à inexistência de uma máquina de medição de força com a ordem de grandeza necessária no Departamento de Engenharia Mecânica.

Capítulo 8

Conclusões e proposta de trabalhos futuros

8.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo o estudo, desenvolvimento, prototipagem e teste funcional do conceito de uma eletroválvula de gás on/off. Preferencialmente, a válvula deve cumprir requisitos como pequenas dimensões, rápida comutação entre estados e baixo consumo face às soluções equivalentes no mercado.

Para isso foi feito um estudo, baseado em soluções comerciais existentes, acerca do caudal de gás necessário. Com isto foi possível ter uma estimativa da área de passagem de fluido, critério fundamental na escolha do tipo de atuação a ser utilizado. Após uma investigação mais pormenorizada neste tema, procuraram-se sistemas de atuação que simultaneamente cumprissem os objetivos do presente trabalho e fossem capazes de prover o deslocamento necessário para a abertura do orifício de passagem de fluxo de gás. A atuação eletromagnética e piezoelétrica foram os resultados dessa seleção.

Conclui-se que a atuação eletromagnética é a que melhor se enquadra no presente trabalho, dado que os materiais piezoelétricos tem um custo elevado, necessitam de sistemas de amplificação devido ao baixo deslocamento produzido e ainda, exigem processos de prototipagem com elevada precisão.

Na tentativa de constituir um conceito de um atuador bi-estável, que necessite de uma tensão à bobine apenas para comutar o estado entre as duas posições estáveis (potenciando a possibilidade do baixo consumo), foram desenvolvidos em ambiente simulado três sistemas propostos, dos quais se podem tirar as seguintes conclusões:

- Num solenóide convencional composto por um êmbolo ferromagnético, no instante em que se inverte o sentido de corrente que percorre as espiras do enrolamento inverte-se o sentido do fluxo magnético. Dado tratar-se de um êmbolo de material ferromagnético, este também inverte a sua polaridade, dependente do sentido do fluxo magnético a que está sujeito, originando assim uma força do solenóide sempre com a mesma direção, o que não é útil para o objetivo do caso em estudo dado que impossibilita a bi-estabilidade do sistema.
- Como resultado da conclusão anterior, o êmbolo de material ferromagnético foi substituído por um íman permanente, fator que torna possível um movimento bi-

direcional. Com a presença de uma armação em ferro, o campo magnético é potenciado porque este material serve de “caminho” ao fluxo magnético, visto que possui uma permeabilidade magnética elevada.

- Também foi possível observar, a partir do modelo matemático do sistema proposto 3, que o fluxo magnético proveniente do íman permanente depende da distância entre o êmbolo e o núcleo ferromagnético do solenóide. O fluxo magnético do enrolamento depende apenas da intensidade de corrente, sendo independente do espaçamento em vazio entre o êmbolo e o material ferromagnético. Este facto pode ser explicado matematicamente, visto que a permeabilidade do íman permanente é muito próxima da permeabilidade do vazio, assumindo-se que $\mu_{iman} = \mu_0$. Mas também porque a aplicação do atuador possui um deslocamento muito pequeno em relação ao comprimento do solenóide, e graças ao núcleo ferromagnético do solenóide um dos polos do íman permanente encontra-se no centro deste, onde o fluxo magnético do enrolamento é assumido constante.

Portanto, o solenóide bi-direcional desenvolvido na presente dissertação difere dos solenóides convencionais. Possui a mesma estrutura que os existentes, envolto por uma armação tubular em ferro, mas com um êmbolo de íman permanente, chave fundamental do trabalho desenvolvido. Quando aplicado o devido sinal, é possível obter movimento nos dois sentidos, como desejado.

O conceito e o protótipo desenvolvidos são essencialmente focados na validação do tipo de atuação, onde teve que se alcançar um equilíbrio entre os parâmetros ideais de simulação e o que foi possível fabricar.

Foi então obtido um sistema representativo do modelo estudado. Demonstrou-se, através dos testes experimentais a validação do modelo implementado em Matlab-Simulink, apresentando pequenos desvios na intensidade de corrente que podem ser explicados pelo solenóide utilizado, que foi adquirido em vez de bobinado com as características ideais, entre outros fatores impossíveis de prever pelo modelo matemático.

O presente trabalho representa um contributo no desenvolvimento de atuadores on/off de baixo consumo, para aplicação em equipamentos de aquecimento de água, representando um valor acrescentado para estes equipamentos.

8.2 Trabalhos futuros

Na presente dissertação foi desenvolvido um modelo capaz de provar a bi-estabilidade do atuador, entre outros objetivos definidos. No entanto, a fim de obter um modelo mais pormenorizado, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Com um número de transições entre posições estáveis por unidade de tempo superior, em que o enrolamento não tem oportunidade de dissipar todo o calor gerado. É oportuno um estudo sobre a influência da temperatura na força gerada pelo atuador.
- Obter a força do íman permanente a partir do catálogo do fabricante impossibilita a otimização dos parâmetros associados à força do íman permanente. Nesse sentido, é interessante o desenvolvimento de um estudo do modelo matemático que caracterize a força do íman permanente.

- ☐ Realizar a otimização presente na Secção [5.1] com recurso a um algoritmo de otimização que calcule os erros entre a resposta do êmbolo esperada e a resposta obtida para cada iteração da variável a otimizar, de forma a achar o melhor valor parametrizável.
- ☐ Estudar os efeitos da histerese no solenóide, visto que este foi desprezado no modelo desenvolvido.
- ☐ Estudo da influência da saturação magnética na contribuição para a eficiência magnética em armações do solenóide do tipo C, D e tubular.

No que concerne a trabalhos futuros na área da prototipagem, também seria valorizada a construção de um protótipo funcional que incluísse a parte fluidica de modo a realizar testes experimentais e aferir valores do caudal de gás proporcionado. E ainda, efetuar um estudo dos custos de fabricação e longevidade do protótipo desenvolvido.

Bibliografia

- [1] P. Valve, “Chapter 15 Proportional valves,” pp. 1–25. [Online]. Disponível em: <http://www.iranfluidpower.com/pdf/All%20hydraulics/Proportional%20Valves.pdf>
- [2] K. A. B. Schulz, Thomas And, Head of Industry Segment Management, “White Paper Proportional valves for closed-loop control of inert gases in process automation,” p. 9, 2014.
- [3] Cashco, “Fluid Flow Basics of Throttling Valves,” p. 56, 2007. [Online]. Disponível em: http://www.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/RefBook_Cashco_Fluid.pdf
- [4] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.amazon.com/Mechanics-Student-McGraw-Hill-Mechanical-Engineering/dp/0077422414>
- [5] E. Elements e R. Basics, “Principles of Direct-Operated Regulators,” *Spring*, pp. 588–619.
- [6] J. Kilby, “The integrated circuit’s early history,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no 1, pp. 109–111, jan 2000. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=811607>
- [7] K. W. Oh e C. H. Ahn, “A review of microvalves,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no 5, pp. R13–R39, may 2006. [Online]. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/7/3/038/meta>
- [8] P. Beater, *Pneumatic Drives*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. [Online]. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-69471-7>
- [9] J. R. Riba, A. G. Espinosa, J. Cusido, J. A. Ortega, e L. Romeral, “Design of Shading Coils for Minimizing the Contact Bouncing of AC Contactors,” em *2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. IEEE, oct 2008, pp. 130–136. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4694935>
- [10] S. Terry, J. Jerman, e J. Angell, “A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 26, no 12, pp. 1880–1886, dec 1979. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1480369>
- [11] R. Smith, R. Bower, e S. Collins, “The design and fabrication of a magnetically actuated micromachined flow valve,” *Sensors and Actuators A:*

- Physical*, vol. 24, no 1, pp. 47–53, may 1990. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424790800479>
- [12] K. Yanagisawa, H. Kuwano, e A. Tago, “Electromagetically driven microvalve,” *Microsystem Technologies*, vol. 2, no 1, pp. 22–25, mar 1995. [Online]. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02739524>
- [13] Y. Shinozawa, T. Abe, e T. Kondo, “A proportional microvalve using a bi-stable magnetic actuator,” em *Proceedings IEEE The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*. IEEE, 1997, pp. 233–237. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=581809>
- [14] H. Ren e E. Gerhard, “Design and fabrication of a current-pulse-excited bistable magnetic microactuator,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 58, no 3, pp. 259–264, mar 1997. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424797013952>
- [15] S. Böhm, G. Burger, M. Korthorst, e F. Roseboom, “A micromachined silicon valve driven by a miniature bi-stable electro-magnetic actuator,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 80, no 1, pp. 77–83, mar 2000. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424799002988>
- [16] D. Bosch, B. Heimhofer, G. Mück, H. Seidel, U. Thumser, e W. Welser, “A silicon microvalve with combined electromagnetic/electrostatic actuation,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 37-38, no C, pp. 684–692, jun 1993. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092442479380116X>
- [17] M. Shikida, K. Sato, S. Tanaka, Y. Kawamura, e Y. Fujisaki, “Electrostatically driven gas valve with high conductance,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 3, no 2, pp. 76–80, jun 1994. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=294324>
- [18] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, R. Ruprecht, e W. K. Schomburg, “An electrostatically actuated polymer microvalve equipped with a movable membrane electrode,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 7, no 3, pp. 224–226, sep 1997. [Online]. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/7/3/038/meta>
- [19] S. H. and Schaible J, Vollmer J, Zengerle R e Strobelt T, “Electrostatic microvalves in silicon with 2-way function for industrial applications 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '01),” pp. 928–31, 2001.
- [20] W. van der Wijngaart, H. Ask, P. Enoksson, e G. Stemme, “A high-stroke, high-pressure electrostatic actuator for valve applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 100, no 2-3, pp. 264–271, sep 2002. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424702000705>
- [21] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, e T. Tang, “MEMS micro-valve for space applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 83, no 1-3, pp. 188–193,

- may 2000. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424799003829>
- [22] M. S. Groen, D. M. Brouwer, R. J. Wiegerink, e J. C. Lötters, “Design Considerations for a Micromachined Proportional Control Valve,” *Micromachines*, vol. 3, no 4, pp. 396–412, apr 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-666X/3/2/396/>
- [23] S. Shoji e M. Esashi, “Microflow devices and systems,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 4, no 4, pp. 157–171, 1999.
- [24] D. Roberts, Hanqing Li, J. Steyn, O. Yaglioglu, S. Spearing, M. Schmidt, e N. Hagood, “A piezoelectric microvalve for compact high-frequency, high-differential pressure hydraulic micropumping systems,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no 1, pp. 81–92, feb 2003. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1183745>
- [25] P. Shao, Z. Rummmler, e W. K. Schomburg, “Polymer micro piezo valve with a small dead volume,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no 2, pp. 305–309, feb 2004. [Online]. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/14/2/020/meta>
- [26] A. Henning, J. Firch, J. Harris, E. Dehan, B. Cozad, L. Christel, Y. Fathi, D. Hopkins, L. Lilly, W. McCulley, W. Weber, e M. Zdeblick, “Microfluidic MEMS for semiconductor processing,” *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, vol. 21, no 4, pp. 329–337, 1998. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=730413>
- [27] A. I. R. Off e A. I. R. On, “Diaphragm valves,” *Metal Finishing*, vol. 94, no 1, p. 70, jan 1996. [Online]. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/4/4/006>
- [28] M. Kohl, D. Dittmann, E. Quandt, B. Winzek, S. Miyazaki, e D. Allen, “Shape memory microvalves based on thin films or rolled sheets,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 273-275, no c, pp. 784–788, dec 1999. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509399004165>
- [29] C. M. Pemble e B. C. Towe, “A miniature shape memory alloy pinch valve,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 77, no 2, pp. 145–148, oct 1999. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424799001570>
- [30] C. Neagu, J. Gardeniers, M. Elwenspoek, e J. Kelly, “An electrochemical microactuator: principle and first results,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 5, no 1, pp. 2–9, mar 1996. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=485209>
- [31] R. Liu, Qing Yu, e D. Beebe, “Fabrication and characterization of hydrogel-based microvalves,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 11, no 1, pp. 45–53, 2002. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=982862>

- [32] K. Yoshida, M. Kikuchi, J.-H. Park, e S. Yokota, "Fabrication of micro electro-rheological valves (ER valves) by micromachining and experiments," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 95, no 2-3, pp. 227–233, jan 2002. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424701007300>
- [33] A. Meckes, J. Behrens, O. Kayser, W. Benecke, T. Becker, e G. Müller, "Microfluidic system for the integration and cyclic operation of gas sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 76, no 1-3, pp. 478–483, aug 1999. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424799000606>
- [34] O. Krusemark, A. Feustel, e J. Molier, *Micro Total Analysis Systems '98*, D. J. Harrison e A. van den Berg, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. [Online]. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-5286-0>
- [35] C. Fu, Z. Rummler, e W. Schomburg, "Magnetically driven micro ball valves fabricated by multilayer adhesive film bonding," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, no 4, p. S96, 2003. [Online]. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/13/4/316/meta>
- [36] J.-W. Choi, K. W. Oh, A. Han, C. A. Wijayawardhana, C. Lannes, S. Bhansali, K. T. Schlueter, W. R. Heineman, H. B. Halsall, J. H. Nevin, A. J. Helmicki, H. T. Henderson, e C. H. Ahn, "Development and characterization of Microfluidix Devices and Systems for Magnetic Bead-Based Biochemical Detection," *Biomedical Microdevices*, vol. 3, no 3, pp. 191–200, 2001. [Online]. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1023/A:1011490627871>
- [37] J. Robertson e K. D. Wise, "A low pressure micromachined flow modulator," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 71, no 1-2, pp. 98–106, 1998. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424798001605>
- [38] L. Yobas, M. Huff, F. Lisy, e D. Durand, "A novel bulk micromachined electrostatic microvalve with a curved-compliant structure applicable for a pneumatic tactile display," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 10, no 2, pp. 187–196, jun 2001. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=925734>
- [39] X. Yang, A. Holke, S. Jacobson, J. Lang, M. Schmidt, e S. Umans, "An Electrostatic, On/Off Microvalve Designed for Gas Fuel Delivery for the MIT Microengine," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, no 4, pp. 660–668, aug 2004. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1321104>
- [40] T. Rogge, Z. Rummler, e W. Schomburg, "Polymer micro valve with a hydraulic piezo-drive fabricated by the AMANDA process," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 110, no 1-3, pp. 206–212, feb 2004. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424703006022>
- [41] C. Rich e K. Wise, "A high-flow thermopneumatic microvalve with improved efficiency and integrated state sensing," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no 2, pp. 201–208, apr 2003. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1192715>

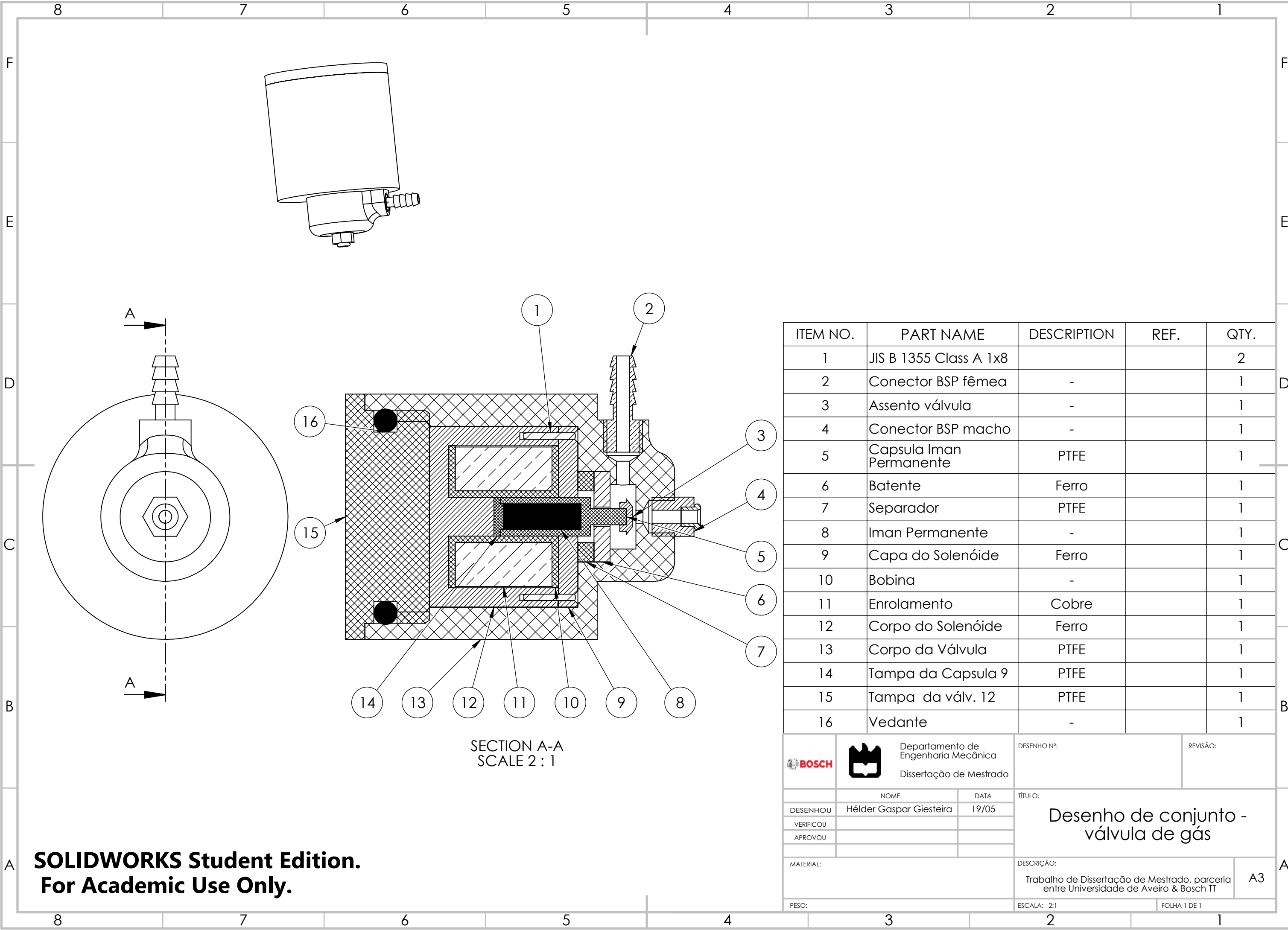
- [42] A. Ruzzu, K. Bade, J. Fahrenberg, e D. Maas, "Positioning system for catheter tips based on an active microvalve system," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 8, no 2, pp. 161–164, jun 1998. [Online]. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0960-1317/8/i=2/a=030?key=crossref.3240bc9edfaee21f5b5a35e968ce14cc>
- [43] Xing Yang, C. Grosjean, e Yu-Chong Tai, "Design, fabrication, and testing of micromachined silicone rubber membrane valves," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no 4, pp. 393–402, 1999. [Online]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=809053>
- [44] C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, W. Menz, e W. K. Schomburg, "Microvalves with bistable buckled polymer diaphragms," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, no 1, pp. 77–79, 1996. [Online]. Disponível em: [http://stacks.iop.org/0960-1317/6/77\\$%5Cdelimiter%26E30F\\$%5Cnhttp://stacks.iop.org/0960-1317/6/i=1/a=017?key=crossref.3bae3054051f5892dc9d39dc73394b09](http://stacks.iop.org/0960-1317/6/77$%5Cdelimiter%26E30F$%5Cnhttp://stacks.iop.org/0960-1317/6/i=1/a=017?key=crossref.3bae3054051f5892dc9d39dc73394b09)
- [45] D. C. VULCANO, "Esquentadores a gás," pp. 1–28, 2010. [Online]. Disponível em: https://vulcano-pt.resource.bosch.com/media/vulcano/documenta__o/folhetos_2/esquentadores_4/Esquentador_Sensor_Atmosfrico_6720680501_06.pdf
- [46] —, "Esquentadores estanques a gás," pp. 1–32, 2013. [Online]. Disponível em: https://vulcano-pt.resource.bosch.com/media/vulcano/documenta__o/folhetos_2/esquentadores_4/MI_VU_WTD12-15-18.pdf
- [47] R. G. Gilbertson e J. D. Busch, "A survey of micro-actuator technologies for future spacecraft missions," *JBIS - Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 49, no 4, pp. 129–138, 1996. [Online]. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.9636&rep=rep1&type=pdf>
- [48] B. P. Actuators, "Rectangular PICMA ® Bender Piezo Actuators," pp. 1–9, 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.piceramic.com/product-detail-page/pl112-pl140-103000.html>
- [49] T. Noliac, "NAC2121," 2016. [Online]. Disponível em: <http://www.noliac.com/products/actuators/ring-actuators/show/nac2121/>
- [50] "FPA-0150E-S-0518-150-SS-1M3 FlexFrame PiezoActuator," p. 6665. [Online]. Disponível em: <http://www.dynamic-structures.com/actuators/#fpa>
- [51] I. Fazal, "Development of a gas microvalve based on fine and micromachining," Dissertação de Doutorado, University of Twente, 2007. [Online]. Disponível em: <http://eprints.eemcs.utwente.nl/11926/>
- [52] S. Lunge, S. Kurode, e M. Chhibber, "Proportional Actuator from On Off Solenoid Valve using Sliding Modes," *1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanism (iNaCoMM2013)*, pp. 1020–1027, 2013. [Online]. Disponível em: http://www.inacomm2013.ammindia.org/Papers/146-inacomm2013_submission_157.pdf
- [53] L. C. A. B. de Pinho, "Materiais Magnéticos e suas Aplicações," Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

- [Online]. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59887/1/000135917.pdf>
- [54] C.-W. Song e S.-Y. Lee, “Design of a Solenoid Actuator with a Magnetic Plunger for Miniaturized Segment Robots,” *Applied Sciences*, vol. 5, no 3, pp. 595–607, sep 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2076-3417/5/3/595/>
- [55] E. P. Furlani, “Permanent Magnet Applications,” em *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. Elsevier, 2001, pp. 207–333. [Online]. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012269951150005X>
- [56] S. Design, “BICRON Electronics Company ISO9001 Certified ISO9001 Certified,” pp. 1–5. [Online]. Disponível em: <http://www.sal.wisc.edu/PFIS/docs/rss-vis/archive/public/Product%20Manuals/bicron/soldesop.pdf>
- [57] D.-G. He, “Bi-directional Solenoid Actuator for Direct Alternative Fuel Injector,” Dissertação de Doutoramento, Concordia University, 2005. [Online]. Disponível em: <http://spectrum.library.concordia.ca/8850/1/MR14306.pdf>
- [58] “K&J magnetics, Inc,” 2016. [Online]. Disponível em: <https://www.kjmagnetics.com/>
- [59] J. Augusto, “Modelação de Sistemas Hidráulicos para Simulação com Hardware-in-the-loop,” Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- [60] E.-m. UK, “NdFeB-Info Neodymium Magnets,” p. 6665. [Online]. Disponível em: http://www.ndfeb-info.com/neodymium_grades.aspx

Anexos

Apêndice A

Desenhos de Fabrico - Proposta conceptual

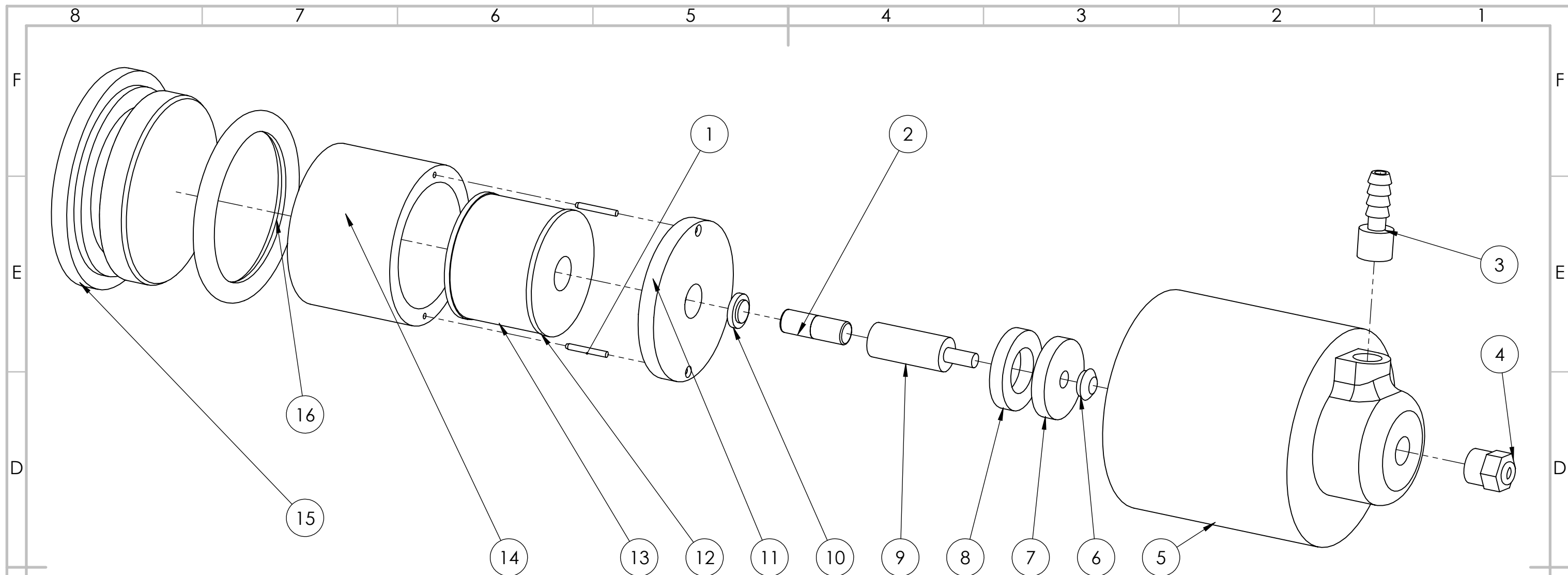


ITEM NO.	PART NAME	DESCRIPTION	REF.	QTY.
1	JIS B 1355 Class A 1x8			2
2	Conector BSP fêmea	-		1
3	Assento válvula	-		1
4	Conector BSP macho	-		1
5	Capsula Iman Permanente	PTFE		1
6	Batente	Ferro		1
7	Separador	PTFE		1
8	Iman Permanente	-		1
9	Capa do Solenóide	Ferro		1
10	Bobina	-		1
11	Enrolamento	Cobre		1
12	Corpo do Solenóide	Ferro		1
13	Corpo da Válvula	PTFE		1
14	Tampa da Capsula 9	PTFE		1
15	Tampa da válv. 12	PTFE		1
16	Vedante	-		1

SECTION A-A
SCALE 2 : 1

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

		Departamento de Engenharia Mecânica		DESENHO Nº:	REVISÃO:
		Dissertação de Mestrado			
DESENHOU	NOME	DATA	TÍTULO: Desenho de conjunto - válvula de gás		
VERIFICOU	Hélder Gaspar Giesteira	19/05			
APROVOU					
MATERIAL:			DESCRIÇÃO:		A3
			Trabalho de Dissertação de Mestrado, parceria entre Universidade de Aveiro & Bosch IT		
PESO:			ESCALA: 2:1		FOLHA 1 DE 1



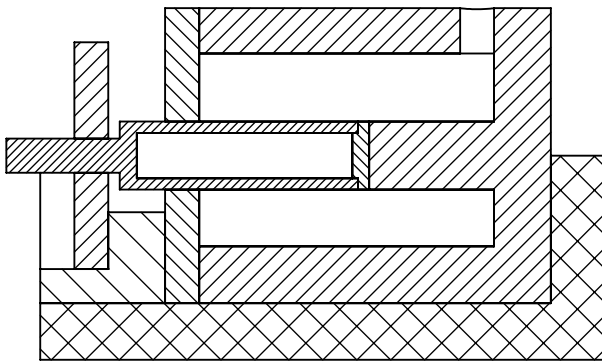
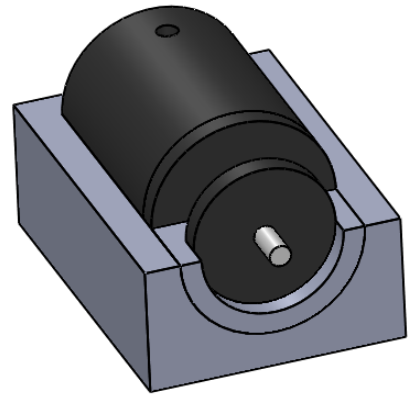
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	REF.	QTY.
1	JIS B 1355 Class A 1x8			2
2	Iman Permanente	-		1
3	Conector BSP fêmea	-		1
4	Conector BSP macho	-		1
5	Corpo da Válvula	PTFE		1
6	Assento válvula	-		1
7	Batente	Ferro		1
8	Separador	PTFE		1
9	Capsula Iman Permanente	PTFE		1
10	Tampa da Capsula 9	PTFE		1
11	Capa do Solenóide	Ferro		1
12	Bobina	-		1
13	Enrolamento	Cobre		1
14	Corpo do Solenóide	Ferro		1
15	Tampa da válv. 12	PTFE		1
16	Vedante	-		1

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

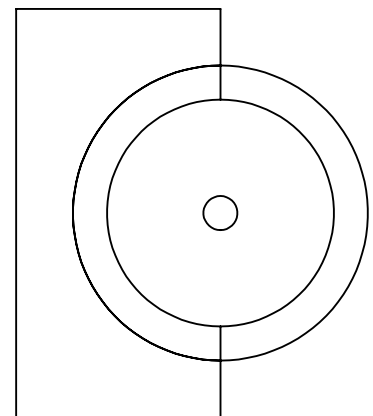
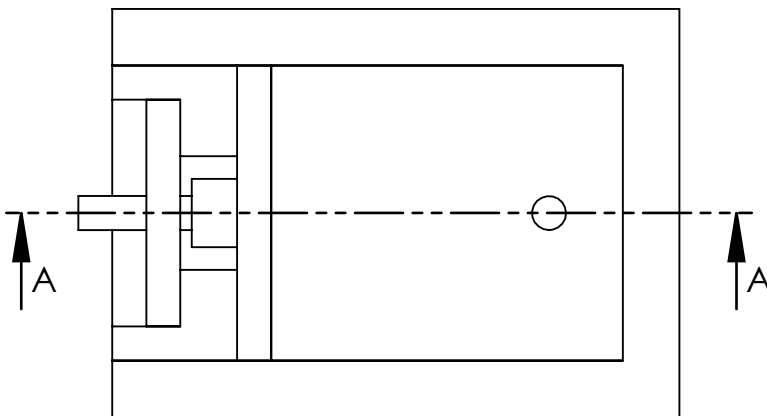
			Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO N.º:	REVISÃO:
	NOME		DATA		TÍTULO: <div>Desenho vista explodida - válvula de gás</div>	
	DESENHOU Hélder Gaspar Giesteira		19/05			
	VERIFICOU					
	APROVOU					
MATERIAL:				DESCRIÇÃO:		A3
				Trabalho de Dissertação de Mestrado, parceria entre a Universidade de Aveiro & Bosch TT		
PESO:				ESCALA: 1,5:1		FOLHA 1 DE 1



Apêndice B

Desenhos de Fabrico - Proposta simplificada



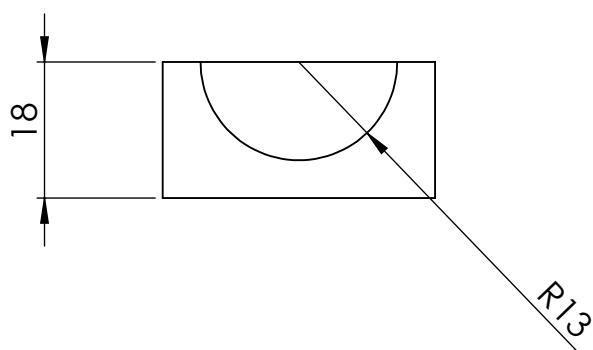
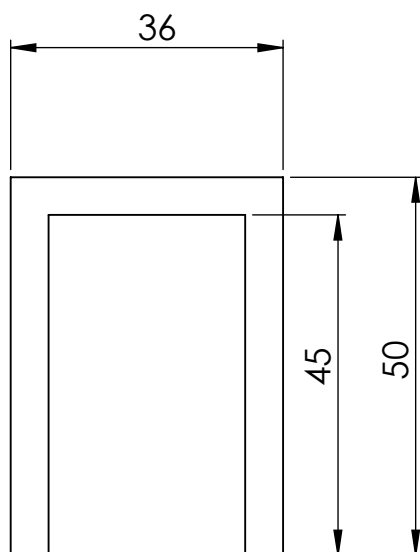
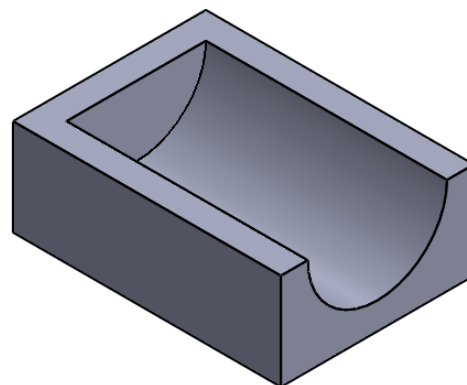
SECTION A-A
SCALE 1.5 : 1





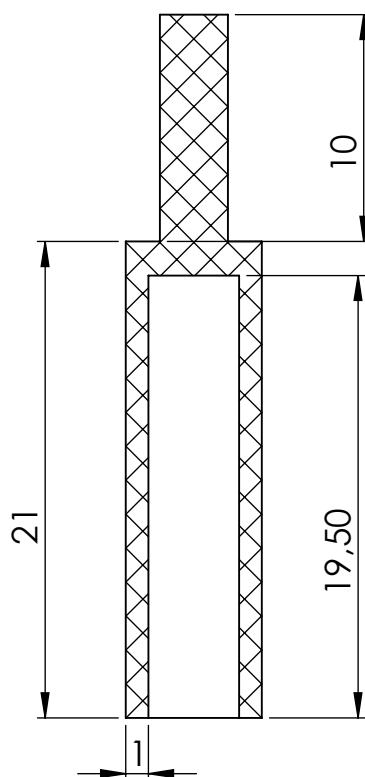
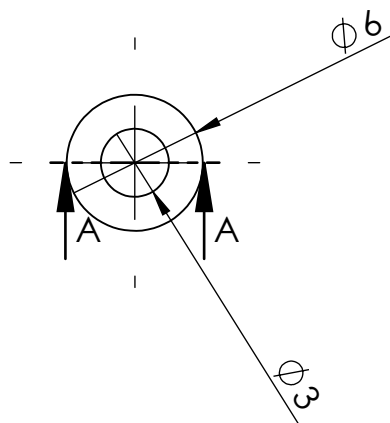
 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO Nº: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">1</div>		REVISÃO:	
DESENHOU Helder Giesteira		01/06/2016		<div style="text-align: center;"> <h1 style="margin: 0;">Desenho de conjunto</h1> <h1 style="margin: 0;">Assembly</h1> </div>			
VERIFICOU							
APROVOU							
PESO:				ESCALA:		FOLHA 1 DE 1	

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.


A4

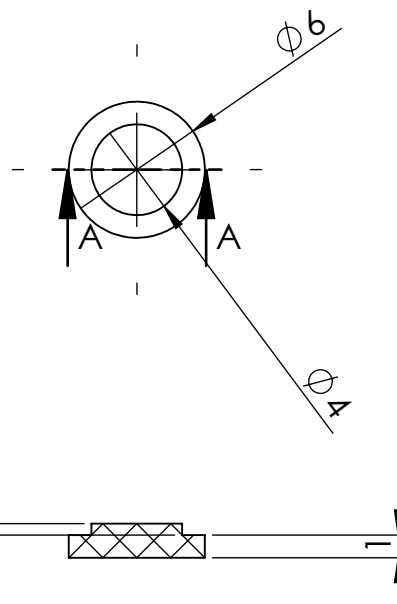


 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO Nº: 2		REVISÃO:	
DESENHOU: Hélder Giesteira		01/06/2016		TÍTULO: <h1>Base do protótipo</h1>			
VERIFICOU:							
APROVOU:							
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.				DESCRIÇÃO: Base de montagem		A4	
PESO:				ESCALA:		FOLHA 1 DE 1	





SECTION A-A
SCALE 3 : 1

 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO Nº: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">3</div>		REVISÃO:	
DESENHOU	Hélder Giesteira	01/06/2016	TÍTULO: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">Cápsula do íman permanente</div>				
VERIFICOU							
APROVOU							
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.			DESCRIÇÃO: Introdução de um espaçamento entre o ferro e o íman permanente			A4	
PESO:			ESCALA:			FOLHA 1 DE 1	

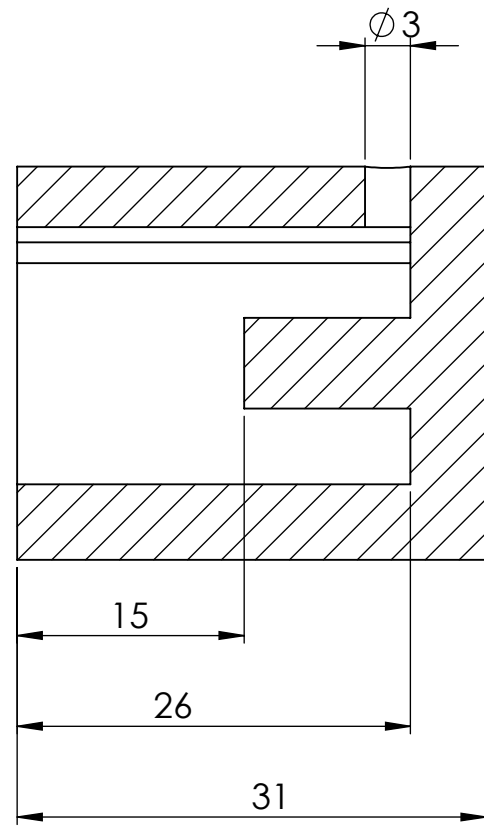
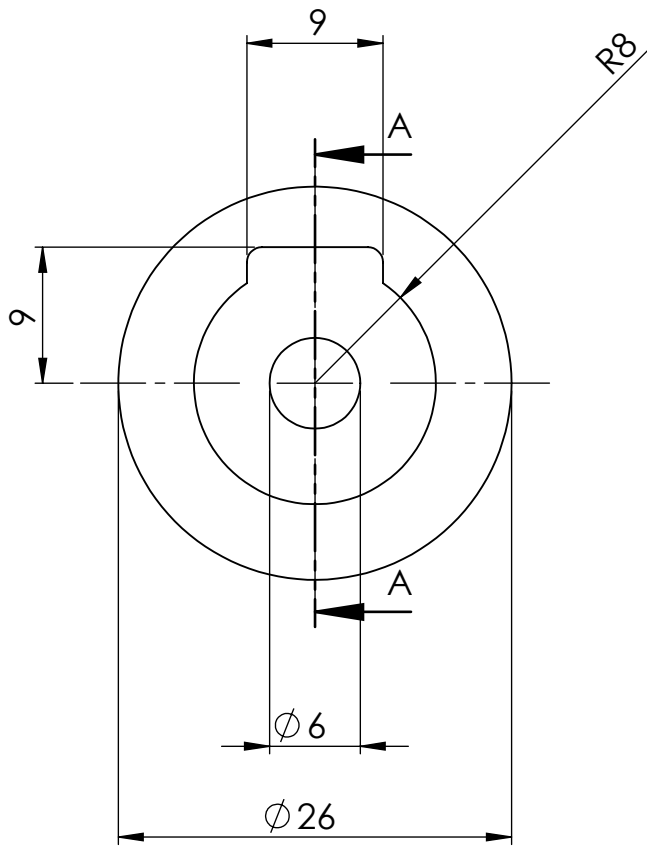
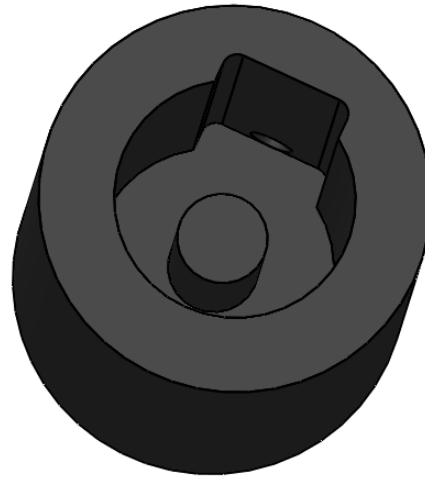


SECTION A-A
SCALE 3 : 1

 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO Nº: 4		REVISÃO:	
DESENHOU: Hélder Giesteira		01/06/2016		TÍTULO: Tampa da cápsula do íman			
VERIFICOU:							
APROVOU:							
PESO:				DESCRIÇÃO: Tampa		A4	
ESCALA:				FOLHA 1 DE 1			

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

PTFE - Teflon

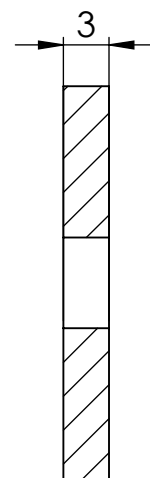
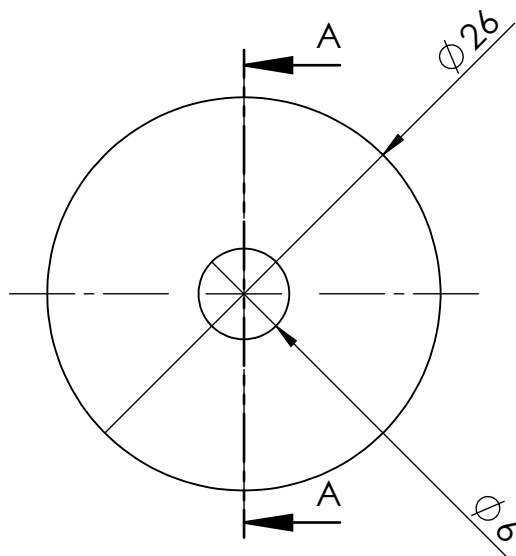


SECTION A-A

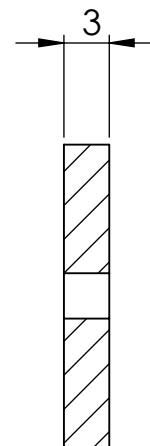
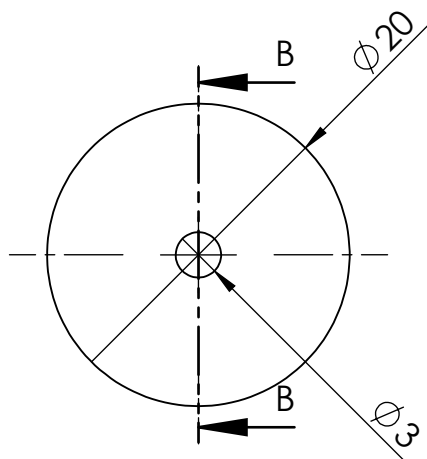
 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO Nº: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">5</div>		REVISÃO:	
DESENHOU Helder Giesteira		01/06/2016		TÍTULO: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">Armação do solenóide</div>			
VERIFICOU							
APROVOU							
PESO:				DESCRIÇÃO: Circuito magnético		A4	
ESCALA:				FOLHA 1 DE 1			

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Ferro

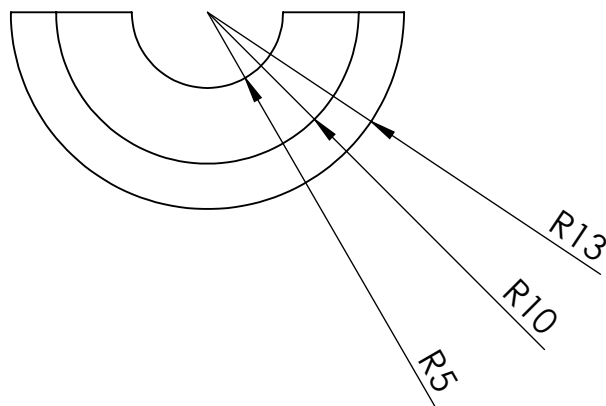
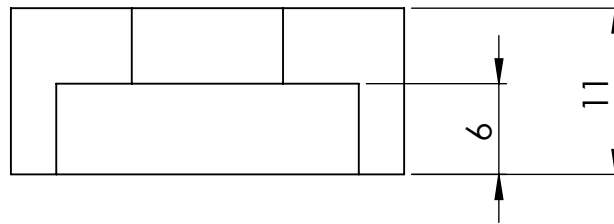
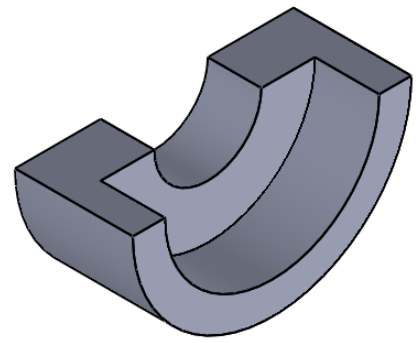




SECTION A-A



SECTION B-B

 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO Nº: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">6</div>		REVISÃO:	
DESENHOU	Hélder Giesteira		01/06/2016	TÍTULO: <div style="font-size: 24pt; text-align: center;">Tampa da armação e limite do êmbolo</div>			
VERIFICOU							
APROVOU							
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.				DESCRIÇÃO: Circuito magnético e atração magnética		A4	
PESO:				ESCALA:		FOLHA 1 DE 1	



 		Departamento de Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado		DESENHO N°: <div style="font-size: 2em; text-align: center;">7</div>		REVISÃO:		
DESENHOU	Hélder Giesteira	01/06/2016	TÍTULO: <div style="font-size: 1.5em; text-align: center;">Separador</div>					
VERIFICOU								
APROVOU								
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.			DESCRIÇÃO: Separador entre armação e limite do êmbolo					A4
PESO:			ESCALA:					FOLHA 1 DE 1